

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|--|
| Расчет радиационной защиты медицинских электронных ускорителей на большие энергии |

УДК 621.039.584:621.384.6:615.84

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------|
| 0АМ6М | Брожик Дарья Сергеевна | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ | Беспалов В.И. | к.ф. – м.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|-----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН | Верховская М.В. | к.э.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент ОЯТЦ | Гоголева Т.С. | к.ф. – м.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------------|------------------------|---------|------|
| Ядерная медицина | Черепенников Ю.М. | к.т.н. | | |

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

| Код результата | Результат обучения |
|-------------------------------------|---|
| Общекультурные компетенции | |
| Р1 | Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности. |
| Р2 | Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности. |
| Р3 | Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной сфере, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности. |
| Р4 | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации. |
| Профессиональные компетенции | |
| Р5 | Применять глубокие математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов. |
| Р6 | Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов. |
| Р7 | Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде. |
| Р8 | Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения |

| Код результата | Результат обучения |
|---------------------------|---|
| | радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине. |
| Р9 | Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности, руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение. |
| Р10 | Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск - менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации. |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) Ядерная физика и технологии
Уровень образования Магистратура
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)
Период выполнения Весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

| |
|--------------------------|
| Магистерская диссертация |
|--------------------------|

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения магистерской диссертации**

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 01.06.2018 |
|--|------------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 10.02.18 | Составление и утверждение технического задания | 7 |
| 05.03.18 | Подбор и изучение материалов по теме | 10 |
| 06.04.18 | Проведение расчетов | 5 |
| 10.05.18 | Анализ и описание результатов | 45 |
| 01.06.18 | Подготовка к защите ВКР | 30 |

Составил преподаватель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОЯТЦ | Беспалов В.И. | к.ф. - м.н. | | 01.06.2018 |

СОГЛАСОВАНО:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------------|------------------------|---------|------------|
| Ядерная медицина | Черепенников Ю.М. | к.т.н. | | 01.06.2018 |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) Ядерные физика и технологии
Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|------------------------|
| 0АМ6М | Брожек Дарье Сергеевне |

Тема работы:

| | |
|--|--------|
| Расчет радиационной защиты медицинских электронных ускорителей на большие энергии | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | №3283К |

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 01.06.2018 |
|--|------------|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|---|
| <p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <p>методика расчета биологической защиты для медицинских ускорителей на большие энергии</p> |
|---|---|

| | |
|--|---|
| <p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>1.Методы расчета биологической защиты от тормозного излучения;</p> <p>2.Методы расчета биологической защиты от фотонейтронного излучения;</p> <p>3.Методы расчета входной двери в помещение ускорителя;</p> <p>4. Расчет защиты помещения ускорителя;</p> <p>5. Анализ полученных результатов;</p> <p>6.Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</p> <p>7. Социальная ответственность.</p> |
| <p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <p>Презентация в среде Microsoft office PowerPoint (23слайда)</p> |

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел | Консультант |
|---|-------------------------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Верховская М.В., доцент ОСГН |
| Социальная ответственность | Гоголева Т.С., ассистент ОЯТЦ |

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

| |
|--|
| 1. Введение |
| 2. Методы расчета радиационной защиты ускорителя |
| 3. Заключение |

| | |
|--|----------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 10.02.18 |
|--|----------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ | Беспалов В.И. | к.ф. – м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------|
| 0АМ6М | Брожик Дарья Сергеевна | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|------------------------|
| 0АМ6М | Брожик Дарье Сергеевне |

| Школа | Инженерная школа ядерных технологий | Отделение | Ядерно-топливного цикла |
|---------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|
| Уровень образования | Магистр | Направление/специальность | 14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерная медицина |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|---|--|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ) | 1.Стоимость расхода электроэнергии 2.Норматив заработной платы |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | 1.Тариф на электроэнергию 2.Коэффициенты для расчета заработной платы |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | 1.Отчисления во внебюджетные фонды 2.Расчет дополнительной заработной платы |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | 1.Потенциальные потребители результатов исследования; 2.SWOT – анализ. |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований | 1.Разработка графика проведения научного исследования; 2.Бюджет научно-технического исследования (нти). |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

| |
|--|
| 1. Матрица SWOT |
| 2. График проведения и бюджет НИ |
| 3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ |

| | |
|--|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|--|--|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Верховская М.В. | К.Э.Н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------|
| 0АМ6М | Брожик Дарья Сергеевна | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|---------------|------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0АМ6М | Брожек Дарье Сергеевне |

| | | | |
|----------------------------|--|----------------------------------|---|
| Школа | Инженерная школа ядерных технологий | Отделение | Ядерно-топливного цикла |
| Уровень образования | Магистр | Направление/специальность | 14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерная медицина |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|--|---|
| 1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: | <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы). |
| 2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|---|
| 1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные). |
| 2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Ассистент ОЯТЦ | Гоголева Т.С. | к.ф. – М.Н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0АМ6М | Брожек Дарья Сергеевна | | |

Реферат

Выпускная квалификационная работа магистра содержит 118 страниц, 9 рисунков, 24 таблиц, 30 источников и 2 приложения.

Ключевые слова: радиационная защита, медицинский линейный ускоритель электронов, тормозное излучение, фотонейтроны.

Объектом исследования является процедурное помещение (каньон) линейного электронного медицинского ускорителя.

Целью данной работы является расчет биологической защиты процедурного помещения (каньона) и лабиринта от тормозного излучения (ТИ) и фотонейтронов линейного электронного ускорителя на энергию 18 МэВ.

В процессе работы изучены методы расчета биологической защиты медицинских электронных ускорителей, проведен расчет биологической защиты корпуса лучевой терапии онкологического центра и анализ полученных результатов.

В результате исследования произведен расчет биологической защиты процедурного помещения линейного электронного медицинского ускорителя на энергию 18 МэВ.

Магистерская работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007 с применением пакетов: Microsoft Excel 2007, Wolfram Mathematica 10, PCLAB, Компас 3D.

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 14 |
| 1. Техническое описание установки..... | 17 |
| 2. Основные нормативы для проектирования защиты..... | 20 |
| 3. Расчет защиты от тормозного излучения | 24 |
| 3.1 Методы расчета первичной защиты от тормозного излучения | 26 |
| 3.1.1 СанПиН 2.6.1.2573-10 [8] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ | 26 |
| 3.1.2 Метод слоев десятикратного ослабления..... | 27 |
| 3.1.3 Специальные номограммы для расчета защиты от первичного ТИ | 28 |
| 3.2 Методы расчета вторичной защиты от ТИ..... | 29 |
| 3.2.1 Защита от рассеянного ТИ..... | 30 |
| 3.2.2 Защита от ТИ утечки | 31 |
| 3.2.3 Защита от излучения, рассеянного пациентом | 32 |
| 3.3 Расчет защиты стен помещения ускорителя от первичного и вторичного тормозного излучения | 32 |
| 4. Расчет защиты от фотонейтронного излучения..... | 47 |
| 4.1 Методы расчета первичной защиты от фотонейтронного излучения.... | 47 |
| 4.1.1 СанПиН 2.6.1.2573-10 [8] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ | 47 |
| 4.1.2 Метод длин релаксаций, представленный в зарубежных работах . | 49 |
| 4.2 Методы расчета вторичной защиты от фотонейтронов..... | 50 |
| 4.2.1 Защита от фотонейтронов утечки | 50 |
| 4.3 Расчет защиты стен помещения ускорителя от фотонейтронного излучения | 51 |
| 5. Расчет лабиринтной защиты | 56 |
| 5.1 Методы расчета мощностей доз | 57 |
| 5.1.1 Мощность дозы от тормозного излучения | 57 |
| 5.1.2 Мощность дозы от захватного гамма-излучения | 58 |
| 5.1.3 Мощность дозы от фотонейтронов | 60 |
| 5.1.4 Метод расчета защитной двери лабиринта | 60 |

| | |
|---|-----|
| 5.2 Расчет мощности эквивалентной дозы на входе в лабиринт и защитной двери лабиринта | 61 |
| 5.2.1 Расчет мощности дозы от тормозного излучения | 61 |
| 5.2.2 Расчет мощности дозы от захватного гамма-излучения | 64 |
| 5.2.3 Расчет мощности дозы от фотонейтронов | 64 |
| 5.2.4 Расчет защитной двери лабиринта | 65 |
| 6. Расчет средней концентрации озона и необходимой кратности воздухообмена при работе с тормозным излучением электронного ускорителя..... | 67 |
| 7. Расчет средней объёмной активности ^{13}N от тормозного излучения ускорителя..... | 69 |
| 8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... | 70 |
| 8.1. Предпроектный анализ | 71 |
| 8.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования..... | 71 |
| 8.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | 72 |
| 8.2 SWOT-анализ..... | 72 |
| 8.3 Планирование научно-исследовательских работ | 75 |
| 8.4 Разработка графика проведения научного исследования | 76 |
| 8.5 Определение плановой себестоимости проведения НИОКР | 78 |
| 8.6 Расчет научно-технического эффекта..... | 83 |
| 9 Социальная ответственность | 85 |
| 9.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов..... | 85 |
| 9.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ | 87 |
| 9.2.1 Организационные мероприятия | 87 |
| 9.2.2 Технические мероприятия..... | 88 |
| 9.2.3 Условия безопасной работы | 90 |
| 9.3 Электробезопасность | 92 |
| 9.4 Пожарная безопасность | 94 |
| Заключение | 97 |
| Список публикаций студента..... | 99 |
| Список использованных источников | 100 |

| | |
|------------------------------|-----|
| Приложение А | 103 |
| Einleitung | 104 |
| 1. Strahlungsgefahr | 106 |
| 2. Strahlenschutz | 108 |
| 3. Berechnungsmethoden | 111 |
| Zusammenfassung..... | 114 |
| Literatur..... | 115 |
| Приложение Б | 116 |
| | 116 |

Введение

Лучевая терапия наряду с хирургией и химиотерапией является одним из основных методов лечения онкологических заболеваний с помощью ионизирующих излучений. У каждого второго больного раком в ходе его болезни используется лучевая терапия. В отличие от медикаментозной химиотерапии, действующей на весь организм больного, лучевая терапия является средством локального действия, в основном на часть тела, где находится опухоль.

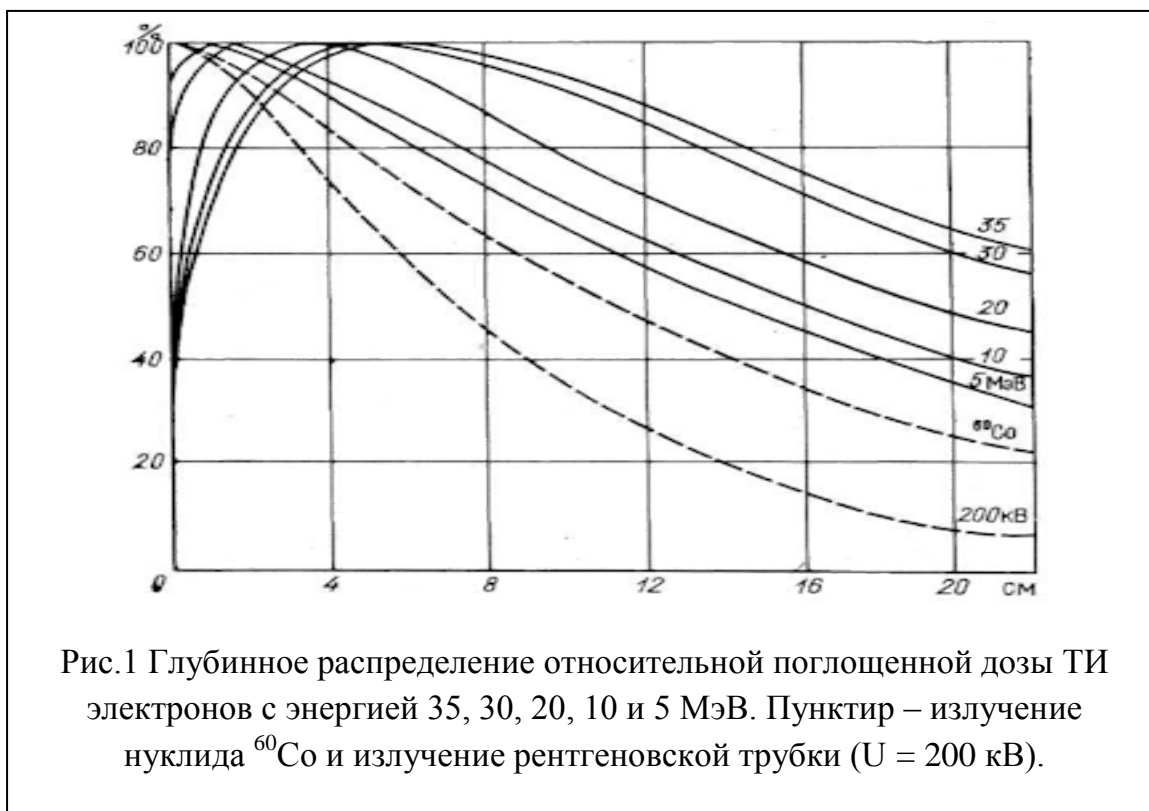
Лет 10...20 назад в качестве излучения, в основном, использовалось гамма-излучение ^{60}Co , рентгеновское излучение и пучки электронов. В последние годы внедряются установки для лечения нейтронами, протонами и тяжелыми ионами, также интенсивно строятся специальные медицинские ротационные электронные ускорители, генерирующие тормозное излучение. Различные виды излучений в зависимости от их физических свойств и особенностей взаимодействия с облучаемой средой создают в организме различные пространственные распределения поглощенной дозы.

Ускорители элементарных частиц являются универсальными источниками излучения, позволяющими менять вид излучения, регулировать энергию излучения, размеры и формы полей облучения и тем самым индивидуализировать программу лучевой терапии опухолей различных локализаций.

Современные медицинские ускорители могут создавать пучки электронов нескольких энергий в диапазоне 4...25 МэВ. Электроны с энергией 5 МэВ используются для облучения поверхностных новообразований, с более высокой энергией (7...15 МэВ) – для воздействия на опухоли средней глубины расположения.

Электроны в результате торможения о мишень генерируют сильно проникающее тормозное излучение (ТИ), используемое в лучевой терапии.

Из рис. 1 видно, что при увеличении энергии электронов увеличивается глубина проникновения ТИ в вещество:



ТИ электронных ускорителей с большими энергиями (более 10 МэВ) является источником фотонейтронов, которые возникают в результате фотоядерных реакций. Эти нейтроны возникают при взаимодействии ТИ с мишенью, генерирующей ТИ, с элементами конструкции ускорителя, защитой и с телом пациента. Относительная биологическая эффективность нейтронного излучения зависит от их энергии и в 5-20 раз больше, чем у тормозного излучения. Следовательно, фотонейтроны являются дополнительной опасностью при использовании медицинских ускорителей на большие энергии для лучевой терапии.

Для эффективной защиты от гамма-излучения используются материалы с большим атомным номером и высокой плотностью. Этим критериям удовлетворяют: свинец, сталь, свинцовое стекло. Защитные стены помещений, как правило, изготавливают из бетона. Толщина стен для больших энергий ТИ может достигать 2...3 м. Для уменьшения толщины

стен в области падения первичного пучка ТИ (первичной защиты) используют вставки из тяжелого бетона, но это увеличивает стоимость защиты.

Процессы взаимодействия нейтронов с веществом существенно отличаются от взаимодействия фотонов, в результате существенно отличаются и материалы защиты от ТИ и нейтронов. Для защиты от нейтронного излучения применяют комбинацию замедлитель-поглотитель. Наилучшие замедлители – водородсодержащие материалы. Обычно применяют воду, парафин, полиэтилен. Также в качестве замедлителей применяют бериллий и графит. Замедленные (тепловые) нейтроны хорошо поглощаются ядрами ^{10}B , ^{113}Cd . В ряде случаев для одновременного поглощения нейтронного и гамма-излучений применяют водные растворы гидроксидов тяжёлых металлов.

Хорошим замедлителем нейтронов является бетон, в составе которого содержится достаточно большое количество ядер водорода.

Целью данной работы является расчет биологической защиты процедурного помещения (каньона) и лабиринта от тормозного излучения и фотонейтронов линейного электронного ускорителя на энергию 18 МэВ.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассчитать толщины стен (бетон) и потолка (бетон) от тормозного излучения и фотонейтронов электронного ускорителя.
2. Рассчитать от ТИ и фотонейтронов защитную дверь лабиринта.
3. Рассчитать среднюю концентрацию озона в каньоне при работе ускорителя.
4. Рассчитать активацию воздуха в каньоне при работе ускорителя.
5. Провести анализ полученных результатов.

1. Техническое описание установки

Медицинский ускоритель Elekta стационарно размещается на первом этаже в специальном процедурном помещении. Смежные с каньоном помещения по горизонтали: комната управления ускорителя, коридоры, территория. Под нижним перекрытием находится земля, над верхним перекрытием – крыша.

Стены и перекрытия процедурного помещения выполнены из бетона плотностью $2,3 \text{ г/см}^3$. Вход в каньон оснащён лабиринтом рис. 1.1. Цифры на рис. 1.1: 1, 2, 3, 4, 5 – номера стен помещений, за каждой стеной своя категория облучаемых лиц с проектной мощностью дозы за стационарной защитой ускорителя электронов для помещений и территории различного назначения.

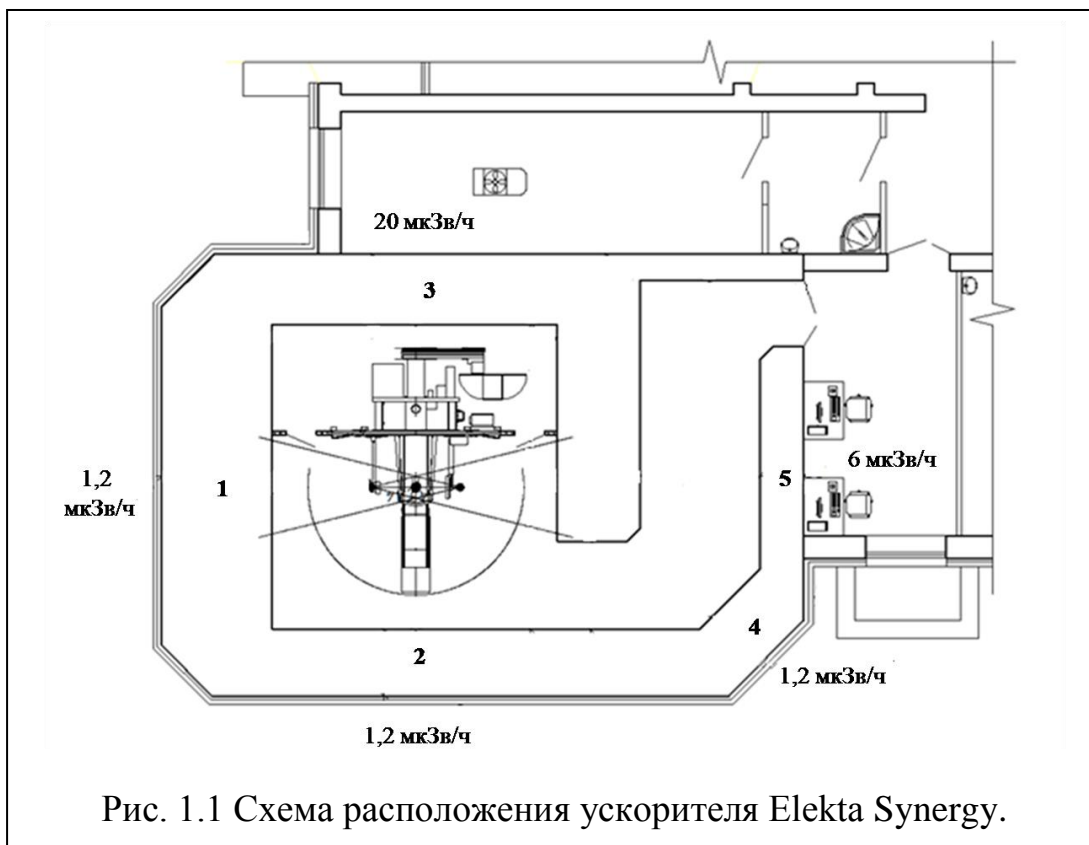


Рис. 1.1 Схема расположения ускорителя Elekta Synergy.

Ускоритель электронов "Elekta Synergy" может работать в одном из двух режимов: в режиме облучения тормозным фотонным излучением и в режиме облучения пучком электронов.

Характеристики и параметры ускорителя представлены в табл. 1.1, табл. 1.2 и табл. 1.3.

Таблица 1.1

Характеристики ускорителя Elekta Synergy

| | |
|---|------------|
| Максимальная энергия ускоренных электронов: | |
| - в режиме облучения фотонами | 18 МэВ |
| - в режиме облучения электронами | 20 МэВ |
| Максимальная мощность дозы тормозного излучения | 6,0 Гр/мин |

Поглощенная доза фотонного излучения вне пучка не превышает 0,1 % от поглощенной дозы в пучке на расстоянии 1 м.

Таблица 1.2

Геометрические параметры ускорителя

| | |
|--|--------|
| Максимальный размер поля облучения в плоскости изоцентра | Ø50 см |
| Расстояние мишень-изоцентр | 100 см |
| Расстояние от изоцентра до пола | 124 см |
| Угол ротации | ±185° |
| Половина угла коллиматора | 28° |

Таблица 1.3

Режим работы ускорителя

| | |
|-----------------------------|---------|
| Режим работы | 2 смены |
| Продолжительность смены | 6 ч |
| Число рабочих дней в неделю | 5 |
| Число рабочих дней в году | 250 |

Число пациентов, проходящих лечение на ускорителе, может достигать 30÷50 человек в смену, доза каждому пациенту 1÷4 Гр за сеанс; при использовании радиохирургических методик – 3÷5 человек в смену, доза каждому пациенту 20÷80 Гр за сеанс; в среднем 15÷25 человек в смену. Для расчётов радиационной безопасности по согласованию с пользователем принято среднее значение рабочей нагрузки 150 Гр в смену.

2. Основные нормативы для проектирования защиты

Воздействие ионизирующего излучения на человека может быть обусловлено внешним, внутренним или смешанным (внешним и внутренним) облучением. Ионизирующее излучение в тканях живых организмов ионизирует атомы и молекулы. Ионизация сопровождается особыми химическими и биологическими процессами в клетках ткани. Степень поражения организма зависит от того, какие органы или ткани подверглись облучению, а также от поглощенной в них дозы излучения и созданного этой дозой биологического эффекта.

Биологический эффект зависит от дробности облучения. Однократное облучение большой дозой приносит больший вред, чем длительное облучение малыми дозами, так как в последнем случае организм успевает частично восстановить поврежденные функции.

В настоящее время действуют «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2010». Они распространяются на все предприятия и учреждения министерств и ведомств, где возможны производство, обработка, применение, хранение, переработка, обезвреживание, транспортировка естественных и искусственных радиоактивных веществ, и других источников ионизирующих излучений.

В соответствии с НРБ-99/2010 устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

1. Персонал – лица, работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

2. Все население, включая лиц персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц по НРБ-99/2010 установлено 3 класса нормативов:

1. Основные пределы доз (ПД);

2. Допустимые уровни (от одного вида излучения) – это производные от основных пределов доз: пределы годового поступления, объемные допустимые среднегодовые активности, допустимая мощность дозы и др.;

3. Контрольные уровни (дозы, активности и др.). Их значения должны быть ниже допустимых уровней.

Примечания:

1) Все нормативные значения приводятся для категории персонала только группы А.

2) Дозовые пределы и допустимые уровни персонала группы Б не должны превышать $\frac{1}{4}$ значений группы А.

Основные пределы доз не включают в себя дозы:

- от природных источников;
- от медицинских источников;
- от радиационных аварий.

На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Эффективная доза для персонала группы А за период трудовой деятельности (50 лет) не должна превышать 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

К работе с источниками ионизирующего излучения допускаются лица не моложе 18 лет и не имеющие медицинских противопоказаний.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, вводятся дополнительные ограничения. Кроме того, администрация предприятия обязана перевести женщину на период беременности и грудного вскармливания ребенка на работы не связанные с ионизирующим излучением. Для студентов и учащихся не моложе 16 лет, проходящих обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

Проектирование защиты от внешнего облучения персонала и населения необходимо проводить с учетом назначения помещений,

категорий облучаемых лиц и длительности облучения с коэффициентом запаса по годовой эффективной дозе не менее 2.

Значения проектной мощности эквивалентной дозы для стандартной продолжительности пребывания в помещениях и на территориях персонала и населения с коэффициентом запаса 2 приведены в табл. 2.1 [7]:

Таблица 2.1

Мощность эквивалентной дозы, используемая при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения.

| Категория облучаемых лиц | | Назначение территорий и помещений | Проектная мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч | Продолжительность облучения, ч/год |
|--------------------------|----------|---|---|------------------------------------|
| Персонал | Группа А | Помещения постоянного пребывания персонала | 6 | 1700 |
| | | Помещения временного пребывания персонала | 12 | 850 |
| | Группа Б | Помещения организации и территория СЗЗ, где находится персонал группы Б | 1,2 | 2000 |
| Население | | Любые другие помещения и территории | 0,06 | 8800 |

Нормативные документы НРБ-2009 и ОСПОРБ-2010 используются для безопасности человека во всех условиях воздействия ионизирующего излучения. При эксплуатации электронных ускорителей используется документ СанПиН 2.6.1.2573-2010[8] для ускорителей на энергии до 100 МэВ трех типов: импульсных, промышленных и медицинских. Согласно данному документу при проектировании защиты помещений корпуса лучевой терапии используются установленные данные, такие как проектная мощность дозы(ДМД), предел дозы и максимальная доля времени, проводимого людьми в данном помещении, представленные в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Установленные значения за стационарной защитой ускорителя электронов
для помещений и территории различного назначения

| Помещение, территория | ПД, мЗв/год | H_{np} , мкЗв/ч | T, относ.ед. |
|--|-------------|-------------------|--------------|
| Помещения постоянного пребывания персонала группы А (все помещения, входящие в состав ОЛТ). | 20 | 6,0 | 1 |
| Помещения временного пребывания персонала группы А | 20 | 12,0 | 0,5 |
| Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой ускорителя, в которых имеются постоянные рабочие места персонала группы Б. | 5 | 1,2 | 1 |
| Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой ускорителя без постоянных рабочих мест (холл, коридор, и др.). | 5 | 5,0 | 0,25 |
| Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак) | 5 | 20 | 0,06 |
| Палаты стационара, смежные по вертикали и горизонтали с кабинетами ЛТ, помещения эпизодического пребывания лиц, не отнесенных к персоналу | 1 | 0,6 | 0,25 |
| Помещения, в которых имеются постоянные рабочие места лиц, не отнесенных к персоналу | 1 | 0,25 | 1 |
| Территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя | 1 | 1,2 | 0,12 |

3. Расчет защиты от тормозного излучения

При расчетах защиты помещений от тормозного излучения (ТИ) на большие энергии выделяют:

- первичную защиту (первичный барьер) – это часть защиты, на которую непосредственно падает ТИ и фотонейтроны рабочего пучка ускорителя.
- вторичную защиту (вторичный барьер) – вся остальная часть защиты.

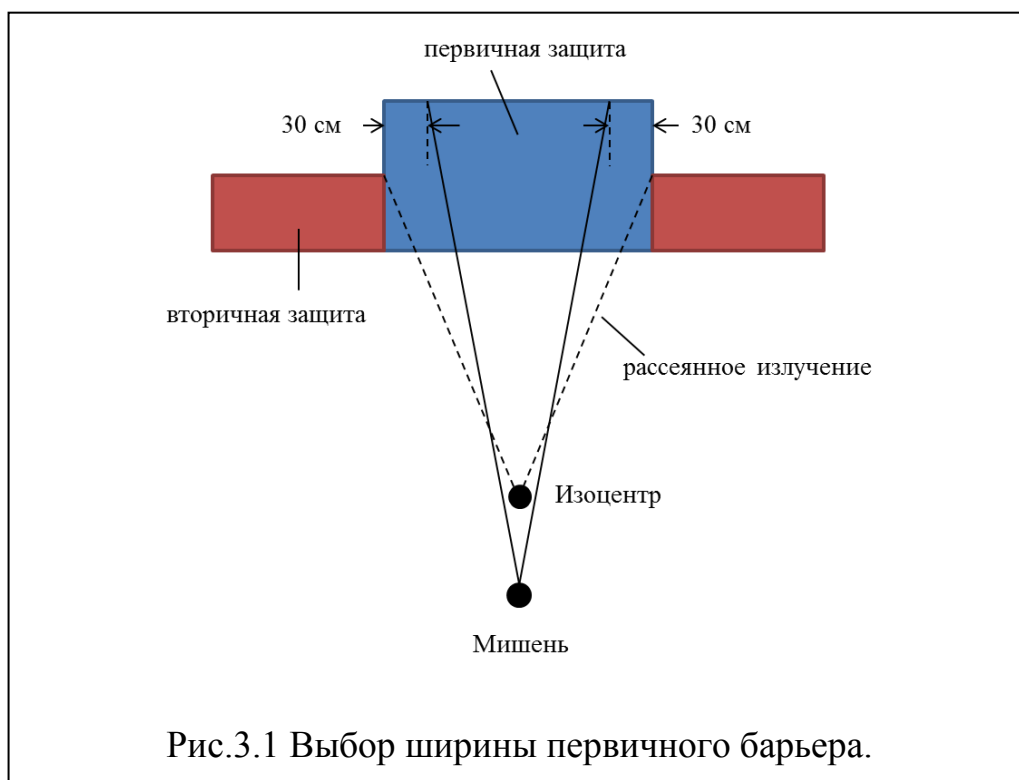
Толщина вторичной защиты определяется следующими излучениями:

- тормозное излучение, рассеянное от стен и пола помещения;
- тормозное излучение утечки – излучение из головки ускорителя вне рабочей области пучка;
- тормозное излучение, рассеянное пациентом;
- вторичное излучение (фотонейтроны и гамма-излучение радиационного захвата), рождающиеся в ротационной головке и в помещении ускорителя.

Защитный материал первичной и вторичной защиты может быть одним и тем же. Однако для уменьшения размеров защиты первичную изготавливают из тяжелого бетона, а вторичную из обычного бетона.

Толщина первичной защиты определяется ослаблением первичного ТИ, а поперечные размеры первичного барьера определяются областью защиты, на которую падает первичный пучок ТИ при максимальных размерах поля облучения.

В иностранных публикациях по расчету защиты от ТИ [14] предлагается устанавливать ширину первичного барьера по максимальным поперечным размерам рабочего пучка и дополнительно добавлять не менее 30 см с каждой стороны. Пример определения установки защиты представлен на рис. 3.1.



Средняя за смену мощность эквивалентной дозы излучения без защиты на расстоянии 1 м от мишени ускорителя для фотонного излучения определялась по формуле:

$$H_1 = \frac{w \cdot 10^6 \cdot W \cdot r^2}{T_{нед}}, \quad (3.1)$$

где W – рабочая нагрузка, равная произведению средней дозы за 1 процедуру на число процедур облучения в неделю, $W = 1500$ Гр/нед.;

w – взвешивающий коэффициент для данного вида излучения;

r – расстояние от источника излучения до изоцентра, 1 м;

$T_{нед} = 60$ ч – продолжительность рабочего времени в неделю (2 смены по 6 часов, 5 рабочих дней);

Средняя за смену мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени ускорителя в соответствии с уравнением (3.1) равна: $H_1 = 2,5 \cdot 10^7$ мкЗв/ч.

Максимальная мощность дозы ТИ в изоцентре равна $3,6 \cdot 10^8$ мкЗв/ч.

В соответствии с [1] поглощенная доза излучения утечки ТИ в плоскости пациента не должна превышать в среднем 0,1% максимальной поглощенной дозы, т. е. мощность эквивалентной дозы ТИ утечки на расстоянии 1 м от мишени вне области рабочего пучка не должна превышать $2,5 \cdot 10^4 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$.

Поглощенная доза утечки ТИ вне плоскости пациента (в направлении 90°) на расстоянии 1 м от оси пучка не должна превышать 0,5% от максимальной поглощенной дозы в изоцентре [1]. В паспортных данных медицинского ускорителя Elekta Synergy[9] эта величина не превышает 0,2%. Используем данные конкретного ускорителя. Мощность эквивалентной дозы ТИ на расстоянии 1 м от мишени вне плоскости пациента в направлении 90° равна $5 \cdot 10^4 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$.

3.1 Методы расчета первичной защиты от тормозного излучения

Для обеспечения большей надежности расчет защиты от первичного тормозного излучения проводился с помощью трех методик.

3.1.1 СанПиН 2.6.1.2573-10 [8] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ

Необходимая толщина защиты от первичного ТИ определялась по необходимой кратности ослабления мощности дозы излучения в защите:

$$K = \frac{H_1}{R^2 \cdot H_{np}}, \quad (3.2)$$

где H_1 – средняя за смену мощность дозы на расстоянии 1 м, $\text{мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$;

H_{np} – проектная мощность дозы, $\text{мкЗв}/\text{ч}$;

Значения проектной мощности дозы (ДМД) определялись согласно табл. 2.2, представленной в СанПиН 2.6.1.2573-10[8], которые рассчитываются исходя из пределов дозы для соответствующих категорий облучаемых лиц.

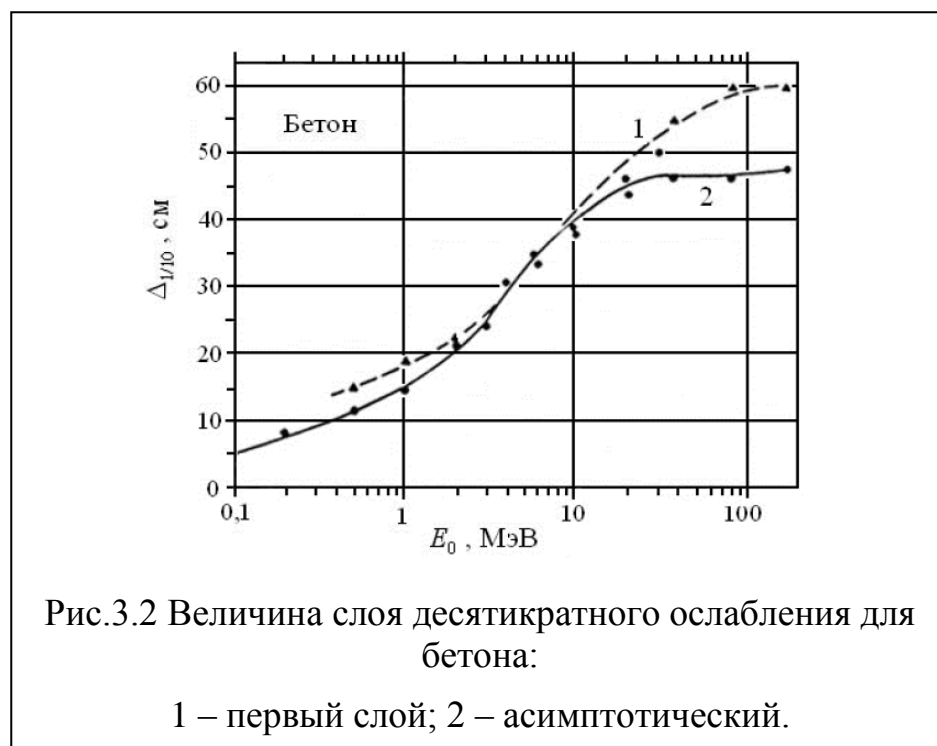
Толщина защиты от ТИ в соответствии с [1, 2] определялась по таблицам ослабления для точечного гамма-источника с эффективной энергией ТИ. Согласно [8], эффективная энергия фотонов равна 1/3 максимальной энергии. При максимальной энергии ускорителя 18 МэВ, эффективная энергия равна 6 МэВ.

3.1.2 Метод слоев десятикратного ослабления

первичного тормозного излучения с использованием данных работы [1];

Слой ослабления указывает толщину защиты, которая ослабляет дозу излучения. Наиболее широко применяют слои половинного $\Delta_{1/2}$ и десятикратного $\Delta_{1/10}$ ослабления. Толщине защите, равной слою десятикратного ослабления, соответствует кратность ослабления 10, а толщине равной $\Delta_{1/2}$, соответствует кратность ослабления 2.

Воспользовавшись данными о толщине слоя десятикратного ослабления $\Delta_{1/10}$ можно найти толщину защиты от тормозного излучения электронного ускорителя. Такие данные имеются для интервала энергий 0,1...100 МэВ и для трех основных веществ защиты: бетона, железа и свинца. Более того, в работе [1] приведены данные, как для первого слоя десятикратного ослабления, так и для следующего $\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$ (асимптотического). На рис. 3.2 представлены слои ослабления для бетона.



Принимаем значения слоев ослабления равными 45 см и 43 см для $\Delta_{1/10}$ и $\Delta_{1/10}^{ac}$ соответственно.

Расчет защиты от ТИ проводим по формуле и с помощью метода итераций:

$$d_n = \Delta_{1/10} + \frac{\Delta_{1/10}^{ac}}{\ln 10} \ln \left[\frac{H_0^{ти}}{10 \cdot \text{ДМД} (R_3 + d_{(n-1)})^2} \right] \text{при } (d_0 = 0), \quad (3.3)$$

Так же с помощью данного метода можно определить мощность эквивалентной дозы за защитой во время работы ускорителя с максимальной мощностью дозы 6 Гр/мин, преобразуя выражение 3.3:

$$\text{ДМД} = \frac{H_0^{ти}}{\exp \left[(d_n - \Delta_{1/10}) / \left(\frac{\Delta_{1/10}^{ac}}{\ln 10} \right) \right] \cdot 10 \cdot R_3^2}, \quad (3.4)$$

3.1.3 Специальные номограммы для расчета защиты от первичного ТИ

в программе «Компьютерная лаборатория» [1].

Номограммы позволяют проводить расчет защиты от ТИ для трех веществ (бетон, железо, свинец).

Для расчета защиты необходимо найти значения специального коэффициента:

$$K_n = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \cdot \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{\text{ДМД} \cdot (R_3 + d_{n-1})^2} \text{при } (d_0 = 0), \quad (3.5)$$

где \bar{w} – взвешивающий коэффициент для тормозного излучения;

i – ток, мА;

R – расстояние от анода трубки, м;

\dot{D}_y и \dot{D}_{yc} – соответственно мощности показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения реального и стандартного ускорителя. Для стандартных условий, если $\dot{D}_{yc} = \dot{D}_y = 1 \text{ мА}$, $= 1 \text{ м}$, а ДМД = 10 мкГр/ч, то $K = 1$.

Формула записана с учетом метода итераций, который учитывает уменьшение плотности потока и дозы с увеличением расстояния до защищаемой области.

Для расчета защиты с помощью номограмм использовалась программа «Компьютерная лаборатория», которая позволяет рассчитать толщину защиты с учетом спектрального состава излучения в 16 направлениях.

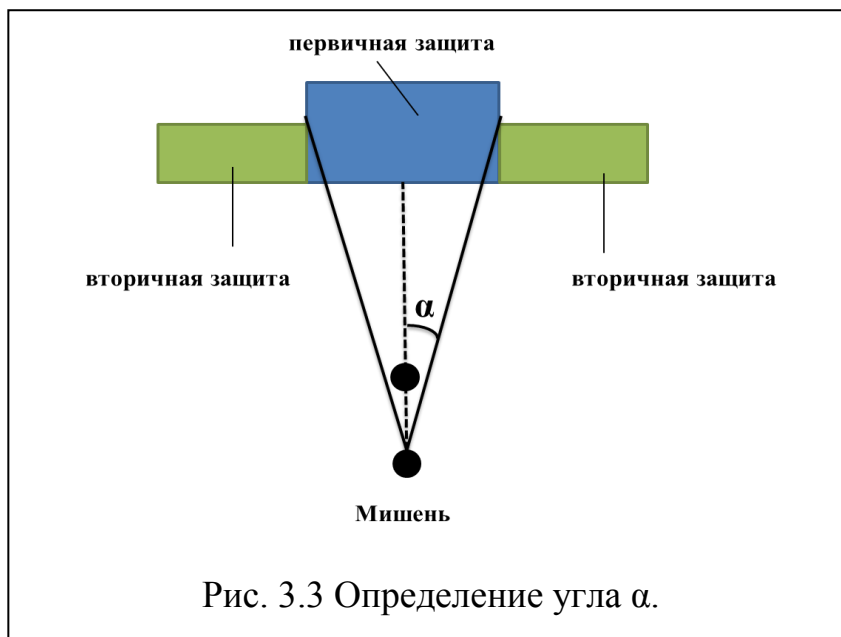
В данной работе ток ускорителя, который используется при расчете в программе, не задан, то будем использовать реальную мощность дозы в изоцентре, полагая ток равным 1 мА.

3.2 Методы расчета вторичной защиты от ТИ

Для ускорителей, генерирующих тормозное излучение, защита под большими углами относительно направления первичного электронного пучка может определяться не только рассеянным излучением, но и первичным ТИ, выходящим из мишени в данном направлении (излучением утечки), так как эффективная энергия и проникающая способность первичного ТИ, выходящего из мишени под любыми углами, много выше, чем у рассеянного

излучения. Поэтому конструкция ускорителя должна обеспечивать достаточное снижение мощности дозы от первичного тормозного излучения вне области рабочего пучка ускорителя.

В этом случае излучение падает под определенным углом, и толщина защиты уменьшается на величину косинуса угла падения излучения на площадку. Угол падения излучения α на площадку определяется согласно рис. 3.3.



3.2.1 Защита от рассеянного ТИ

В [8] нет методики для расчета защиты от рассеянного тормозного излучения, также не можем рассчитать по методу слоев ослабления. Поэтому расчет толщины защиты выполняем с помощью специальных номограмм для рассеянного излучения в программе «Компьютерная лаборатория».

Для расчета защиты также находится значение специального коэффициента:

$$K_n = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega_0} \frac{i \cdot 6}{\text{ДМД} \cdot (R_3 + d_{n-1})^2} \text{при } (d_0 = 0), \quad (3.6)$$

где $\Delta\Omega$ – величина телесного угла коллиматора первичного пучка;

$\Delta\Omega_0$ – «стандартный» телесный угол, равный 1 ср;

$6 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^2 / \text{ч} \cdot \text{мА}$ – «единичная мощность эквивалентной дозы» за защитой на расстоянии 1 м от мишени ускорителя при токе 1 мА.

Если ток ускорителя не задан, будем использовать реальную мощность дозы в изоцентре.

3.2.2 Защита от ТИ утечки

Расчет толщины защиты от излучения утечки будем проводить уже представленными в разделе 3.1 методами для расчета защиты от первичного тормозного излучения.

Значения слоев десятикратного ослабления берем из данных в зарубежном источнике [17], приведенных на табл. 3.1 для расчета в направлении 30° и 90° (в плоскости либо вне плоскости пациента) относительно оси пучка.

Таблица 3.1

Значения слоев десятикратного ослабления: TVL_1 – первый слой;

TVL_e – асимптотический

| Энергия, МэВ | TVL_1 , см | TVL_2 , см |
|--------------|--------------|--------------|
| 4 | 33 | 28 |
| 6 | 34 | 29 |
| 10 | 35 | 31 |
| 15 | 36 | 33 |
| 18 | 36 | 34 |
| 20 | 36 | 34 |
| 25 | 37 | 35 |
| 30 | 37 | 36 |

Принимаем значения слоев ослабления равными 36 см и 34 см для $\Delta_{1/10}$ и $\Delta_{1/10}^{ac}$ соответственно.

3.2.3 Защита от излучения, рассеянного пациентом

Для расчета защиты от тормозного излучения, рассеянного пациентом используем метод слоев ослабления, представленный в работе [14]:

$$d_n = \frac{\Delta_{1/10}}{\ln 10} \ln \frac{a(\theta) \bar{w} W T \left(\frac{F}{400} \right)}{\text{ПДД } d_{sca}^2 (R_3 + d_{(n-1)})^2} \text{ при } (d_0 = 0), \quad (3.7)$$

где d_{sca} – расстояние от мишени ускорителя до пациента, м;

R_3 – расстояние от пациента (изоцентра) до защиты, м;

$a(\theta)$ – дифференциальное дозовое альbedo ТИ в зависимости от угла рассеяния θ для площади облучения 400 см^2 ;

W – рабочая нагрузка – поглощенная доза ТИ на расстоянии 1 м от мишени, Гр в неделю;

F – площадь поля облучения пациента на расстоянии 1 м от мишени (см^2). Рассеянное излучение нормируется к площади облучения $20 \times 20 \text{ см}^2$;

T – доля рабочего времени для человека, который находится в защищаемой области наибольшее время;

\bar{w} – взвешивающий коэффициент излучения;

ПДД – предельно допустимая доза (Зв в неделю).

3.3 Расчет защиты стен помещения ускорителя от первичного и вторичного тормозного излучения

Стена 1

Состоит из первичной и вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

Первичная защита

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 1,9 \cdot 10^7$, толщина защиты $d_{11} = 269 \text{ см}$.

- по слоям ослабления

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 252 \text{ см}$.

- по номограммам

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18 \text{ МэВ}$;
- направление вперед с углом 0° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч .

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 3,28 \cdot 10^{-5}$;
- кратность ослабления $k = 5,37 \cdot 10^5$;
- толщина защиты $d_{13} = 257 \text{ см}$.

Значение толщины защиты от первичного излучения примем равным 260 см , принимая во внимание расчеты по специальным номограммам, так как программа позволяет рассчитать толщину защиты с изменениями спектра излучения с изменением направления, следовательно, полученное значение будет наиболее достоверно.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за первичной защитой равна $34,5 \text{ мкЗв/ч}$.

Вторичная защита

Определяется рассеянным излучением и излучением утечки.

В программе «Компьютерная лаборатория» рассчитать излучение утечки можно только для 15 или 20 МэВ . Используем наибольшую энергию.

Угол падения излучения на площадку $\alpha = 22^\circ$ (см. рис. 3.3). В этом случае толщина защиты уменьшается на величину косинуса угла падения излучения на площадку.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20 \text{ МэВ}$;
- половина угла коллиматора 14° ;

- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,025 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 6,2 \cdot 10^{-6}$;
- кратность ослабления $k = 2,88 \cdot 10^3$;
- толщина защиты $d_{14} = 44$ см.

$$d_{14} = 44 \cdot \cos 22^\circ = 41 \text{ см.}$$

- излучение утечки

Мощность дозы в данном направлении равна 0,025 Гр/ч.

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 1,7 \cdot 10^3$, толщина защиты $d_{15} = 145$ см.

$$d_{15} = 145 \cdot \cos 22^\circ = 132 \text{ см.}$$

- по слоям ослабления

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{16} = 104$ см.

$$d_{16} = 104 \cdot \cos 22^\circ = 96 \text{ см.}$$

- по номограммам

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;
- направление вперед с углом в 30° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,025 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 8,07 \cdot 10^{-7}$;
- кратность ослабления $k = 9,11 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{17} = 122$ см.

$$d_{17} = 122 \cdot \cos 22^\circ = 113 \text{ см.}$$

- излучение, рассеянное пациентом

Для расчета защиты используем уравнение (3.6). И для условий нашего примера в направлении 30° имеем:

$$d_{sca} = 1 \text{ м; } \Delta_{1/10} = 32 \text{ см; } a(30^\circ) = 2,53 \cdot 10^{-3}; W = 750 \text{ Гр в неделю; } F = 40 \times 40 \text{ см}^2; T = 1/20; \bar{w} = 1; \text{ПДД} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Зв в неделю.}$$

Поставляя все данные в уравнение, после трех итераций получаем толщину защиты вдоль нормали к стене:

$$d_p^{\text{ти}}(30^\circ) = 98 \cdot \cos 30^\circ = 85 \text{ см.}$$

Значение толщины защиты от вторичного излучения, исходя из расчетов, определяется излучением утечки и равно 115 см. Толщин защиты от рассеянного излучения меньше почти в три раза, а защита от излучения, рассеянного пациентом меньше в полтора раза.

Стена 2

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

Вторичная защита определяется только рассеянным излучением и излучением утечки.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20 \text{ МэВ;}$
- половина угла коллиматора 14° ;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 3,28 \cdot 10^{-5}$;
- кратность ослабления $k = 3,28 \cdot 10^{-5}$;
- толщина защиты $d_{21} = 45 \text{ см.}$

- излучение утечки

Мощность дозы в данном направлении равна 0,005 Гр/ч.

- *по СанПиН 2.6.1.2573*

Коэффициент ослабления $K = 4 \cdot 10^3$, толщина защиты $d_{22} = 159$ см.

- *по слоям ослабления*

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{23} = 116$ см.

- *по номограммам*

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;

- направление вперед с углом в 85° между электронным и тормозным пучком;

- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,005 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;

- коэффициент $K = 3,01 \cdot 10^{-5}$;

- кратность ослабления $k = 2,1 \cdot 10^3$;

- толщина защиты $d_{24} = 123$ см.

- излучение, рассеянное пациентом

Для расчета защиты используем уравнение (3.6). И для условий нашего примера в направлении 90° имеем:

$d_{sca} = 1$ м; $a(90^\circ) = 1,89 \cdot 10^{-4}$; $W = 750$ Гр в неделю; $F = 40 \times 40$ см²; $T = 1/40$; $\bar{w} = 1$; ПДД = $1,9 \cdot 10^{-5}$ Зв в неделю.

Поставляя все данные в уравнение, после трех итераций получаем толщину защиты вдоль нормали к стене:

$$d_p^{ти}(90^\circ) = 55 \text{ см.}$$

Значение толщины защиты от вторичного излучения, исходя из расчетов, определяется излучением утечки и равно 125 см.

Во время работы ускорителя с максимальной мощностью дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за вторичной защитой равна 8,4 мкЗв/ч.

Стена 3

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 20 мкЗв/ч.

Вторичная защита определяется только рассеянным излучением и излучением утечки.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20$ МэВ;
- половина угла коллиматора 14° ;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 3,65 \cdot 10^{-7}$;
- кратность ослабления $k = 1,69 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{31} = 29$ см.

- излучение утечки

Мощность дозы в данном направлении равна 0,005 Гр/ч.

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 182$, толщина защиты $d_{32} = 105$ см.

- по слоям ослабления

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{33} = 74$ см.

- по номограммам

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;

- направление вперед с углом в 85° между электронным и тормозным пучком;

- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,005 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 1,79 \cdot 10^{-6}$;
- кратность ослабления $k = 1,26 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{34} = 76$ см.

• излучение, рассеянное пациентом

Для расчета защиты используем уравнение (3.6). И для условий нашего примера в направлении 90° имеем:

$d_{sca} = 1$ м; $a(90^\circ) = 1,89 \cdot 10^{-4}$; $W = 750$ Гр в неделю; $F = 40 \times 40$ см²; $T = 1/40$; $\bar{w} = 1$; ПДД = $1,9 \cdot 10^{-5}$ Зв в неделю.

Поставляя все данные в уравнение, после трех итераций получаем толщину защиты вдоль нормали к стене:

$$d_p^{ти}(90^\circ) = 52 \text{ см.}$$

Значение толщины защиты от вторичного излучения, исходя из расчетов, определяется излучением утечки и равно 80 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за вторичной защитой равна 134 мкЗв/ч.

Стена 4

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

Вторичная защита определяется только рассеянным излучением и излучением утечки.

Угол падения излучения на площадку $\alpha = 5^\circ$. В этом случае угол падения незначительно влияет на установление толщины защиты,

следовательно, не будем умножать на косинус угла.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20$ МэВ;
- половина угла коллиматора 14° ;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 1,69 \cdot 10^{-6}$;
- кратность ослабления $k = 7,86 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{41} = 37$ см.

- излучение утечки

Мощность дозы в данном направлении равна 0,005 Гр/ч.

- *по СанПиН 2.6.1.2573*

Коэффициент ослабления $K = 803$, толщина защиты $d_{42} = 132$ см.

- *по слоям ослабления*

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{43} = 97$ см.

- *по номограммам*

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;
- направление вперед с углом в 85° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,005 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 8,69 \cdot 10^{-6}$;
- кратность ослабления $k = 6,07 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{44} = 102$ см.

- излучение, рассеянное пациентом

Для расчета защиты используем уравнение (3.6). И для условий нашего примера в направлении 90° имеем:

$d_{sca} = 1$ м; $a(90^\circ) = 1,89 \cdot 10^{-4}$; $W = 750$ Гр в неделю; $F = 40 \times 40$ см²; $T = 1/40$; $\bar{w} = 1$; ПДД = $1,9 \cdot 10^{-5}$ Зв в неделю.

Поставляя все данные в уравнение, после трех итераций получаем толщину защиты вдоль нормали к стене:

$$d_p^{ти}(90^\circ) = 52 \text{ см.}$$

Значение толщины защиты от вторичного излучения, исходя из расчетов, определяется излучением утечки, (отличие значений толщин защиты рассеянного излучения и излучения утечки почти в три раза) и примем равным 105 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за вторичной защитой равна 6,5 мкЗв/ч.

Стена 5

Состоит из первичной и вторичной защиты. ДМД = 6 мкЗв/ч.

Первичная защита

- *по СанПиН 2.6.1.2573*

Коэффициент ослабления $K = 6 \cdot 10^4$, толщина защиты $d_{51} = 208$ см.

- *по слоям ослабления*

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{52} = 202$ см.

- *по номограммам*

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;
- направление вперед с углом в 0° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 2,24 \cdot 10^{-6}$;
- кратность ослабления $k = 3,67 \cdot 10^4$;
- толщина защиты $d_{53} = 204$ см.

Значение толщины защиты от первичного излучения примем равным 205 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за первичной защитой равна 114 мкЗв/ч.

Вторичная защита

Определяется рассеянным излучением и излучением утечки.

Угол падения излучения на площадку $\alpha = 25^\circ$ (см. рис. 3.3). В этом случае толщина защиты уменьшается на величину косинуса угла падения излучения на площадку.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20$ МэВ;
- половина угла коллиматора 14° ;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 2,91 \cdot 10^{-7}$;
- кратность ослабления $k = 1,35 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{54} = 27$ см.

$$d_{54} = 27 \cdot \cos 25^\circ = 25 \text{ см.}$$

- излучение утечки

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 70$, толщина защиты $d_{55} = 87$ см.

$$d_{55} = 87 \cdot \cos 25^\circ = 79 \text{ см.}$$

- *по слоям ослабления*

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{56} = 62 \text{ см.}$

$$d_{56} = 62 \cdot \cos 25^\circ = 56 \text{ см.}$$

- *по номограммам*

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18 \text{ МэВ};$
- направление вперед с углом в 30° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна $0,025 \text{ Гр/ч.}$

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 4,91 \cdot 10^{-8};$
- кратность ослабления $k = 5,54 \cdot 10;$
- толщина защиты $d_{57} = 70 \text{ см.}$

$$d_{57} = 70 \cdot \cos 25^\circ = 64 \text{ см.}$$

- *излучение, рассеянное пациентом*

Для расчета защиты используем уравнение (3.6). И для условий нашего примера в направлении 30° имеем:

$$d_{sca} = 1 \text{ м}; \Delta_{1/10} = 32 \text{ см}; a(30^\circ) = 2,53 \cdot 10^{-3}; W = 750 \text{ Гр в неделю}; F = 40 \times 40 \text{ см}^2; T = 1/20; \bar{w} = 1; \text{ПДД} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Зв в неделю.}$$

Поставляя все данные в уравнение, после трех итераций получаем толщину защиты вдоль нормали к стене:

$$d_p^{ТИ}(30^\circ) = 78 \cdot \cos 30^\circ = 67 \text{ см.}$$

Значения толщин защиты от излучения утечки и от излучения, рассеянного пациентами почти совпадают. Отличие значений толщин защиты рассеянного излучения почти в три раза. Значение толщины защиты примем равным 70 см.

Потолок

Поворот гентри 360° , первичное излучение может попадать на потолок.

Состоит из первичной и вторичной защиты, ДМД = 20 мкЗв/ч.

Первичная защита

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 5 \cdot 10^4$, толщина защиты $d_{51} = 218$ см.

- по слоям ослабления

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{52} = 202$ см.

- по номограммам

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;

- направление вперед с углом в 0° между электронным и тормозным пучком;

- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;

- коэффициент $K = 2,36 \cdot 10^{-6}$;

- кратность ослабления $k = 3,87 \cdot 10^4$;

- толщина защиты $d_{53} = 205$ см.

Значение толщины защиты от первичного излучения примем равным 205 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы за первичной защитой равна 114 мкЗв/ч.

Вторичная защита

Определяется рассеянным излучением и излучением утечки.

Угол падения излучения на площадку $\alpha = 30^\circ$ (см. рис. 3.3). В этом случае толщина защиты уменьшается на величину косинуса угла падения излучения на площадку.

- рассеянное излучение

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 20$ МэВ;
- половина угла коллиматора 14° ;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 25 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 4,25 \cdot 10^{-7}$;
- кратность ослабления $k = 1,97 \cdot 10^2$;
- толщина защиты $d_{54} = 29$ см.

$$d_{54} = 29 \cdot \cos 30^\circ = 25 \text{ см.}$$

- излучение утечки

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 1 \cdot 10^2$, толщина защиты $d_{55} = 96$ см.

$$d_{55} = 96 \cdot \cos 30^\circ = 84 \text{ см.}$$

- по слоям ослабления

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{56} = 66$ см.

$$d_{56} = 66 \cdot \cos 30^\circ = 57 \text{ см.}$$

- по номограммам

Вводимые параметры в программу:

- $E_0 = 18$ МэВ;
- направление вперед с углом в 30° между электронным и тормозным пучком;
- средняя мощность поглощенной дозы ТИ в изоцентре равна 0,025 Гр/ч.

В процессе расчета получаем:

- число итераций 3;
- коэффициент $K = 6,67 \cdot 10^{-8}$;

- кратность ослабления $k = 7,52 \cdot 10$;

- толщина защиты $d_{57} = 76$ см.

$$d_{57} = 76 \cdot \cos 30^\circ = 66 \text{ см.}$$

Значение толщины защиты от вторичного излучения, исходя из расчетов, определяется излучением утечки, (отличие значений толщин защиты рассеянного излучения и излучения утечки почти в три раза) и примем равным 70 см.

По предложенным трем методам были рассчитаны толщины защиты от первичного и вторичного тормозного излучения. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 3.2, табл. 3.3.

Толщину защиты от рассеянного тормозного излучения рассчитаны только в программе «Компьютерная лаборатория» и представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.2

Расчетные значения толщин первичной защиты от ТИ, рассчитанные в программе «Компьютерная лаборатория» (КЛ), методом слоев ослабления и согласно СанПин 2.6.1.2573

| Направление | Толщина защиты из бетона, см | | |
|-------------|------------------------------|----------------|------------------------|
| | СанПин | Программа «КЛ» | Метод слоев ослабления |
| Стена 1 | 269 | 257 | 252 |
| Стена 5 | 208 | 204 | 202 |
| Потолок | 218 | 205 | 201 |

Таблица 3.3

Расчетные значения толщин вторичной защиты от ТИ, рассчитанные в программе «Компьютерная лаборатория» (КЛ), методом слоев ослабления и согласно СанПин 2.6.1.2573.

| Направление | Толщина защиты из бетона, см | | |
|-------------|------------------------------|----------------|------------------------|
| | СанПин | Программа «КЛ» | Метод слоев ослабления |
| Стена 1 | 104 | 88 | 75 |
| Стена 2 | 159 | 123 | 116 |
| Стена 3 | 105 | 76 | 74 |
| Стена 4 | 132 | 102 | 97 |
| Стена 5 | 85 | 69 | 65 |
| Потолок | 84 | 66 | 57 |

По полученным данным можем сделать вывод о согласии трех методов расчета. Различие полученных данных толщин защиты не превышает 15%.

В табл. 3.4 представлены окончательные значения толщин защиты от ТИ. Для уменьшения стоимости защиты предлагается защиту от первичного излучения сделать из тяжелого бетона (баритобетона), с плотностью 3,5 г/см².

Таблица 3.4

Значения толщин стен для защиты от тормозного излучения

| Направление | Толщина защиты из бетона, см | |
|-------------|--|-----------------------------------|
| | Первичная (тяжелый бетон/обычный бетон) | Вторичная (из обычного бетона) |
| Стена 1 | 175/260 | 115 |
| Стена 2 | — | 125 |
| Стена 3 | — | 80 |
| Стена 4 | — | 105 |
| Стена 5 | 140/210 | 70 |
| Потолок | 140/210 | 70 |

4. Расчет защиты от фотонейтронного излучения

Медицинские ускорители при энергиях электронов более 10 МэВ являются источниками не только тормозного излучения (ТИ), но и фотонейтронов. Защита от фотонейтронов должна рассчитываться так же подробно, как и от ТИ, однако инженерные методы расчета являются менее точными. Это обусловлено следующими причинами:

- большие пространственные размеры источника нейтронов. Стены, пол, потолок помещения и находящееся в нем оборудование являются источниками низкоэнергетических нейтронов;
- необходимо учитывать фотонейтроны, рассеянные от пациента;
- для медицинских ускорителей выход фотонейтронов зависит от размеров рабочего поля, создаваемого диафрагмой;
- необходимо оценивать вклад от гамма- излучения радиационного захвата, имеющего среднюю энергию 3 МэВ и обладающего большой проникающей способностью;
- сложная зависимость взвешивающего коэффициента излучения для нейтронов от их энергии;
- защитные материалы от ТИ и нейтронного излучения существенно отличаются.

4.1 Методы расчета первичной защиты от фотонейтронного излучения

Для обеспечения большей надежности расчет защиты от первичного фотонейтронного излучения проводился с помощью двух методик.

4.1.1 СанПиН 2.6.1.2573-10 [8] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ

Необходимая толщина защиты определялась по необходимой кратности ослабления мощности дозы излучения в защите:

$$K = \frac{H_1}{R^2 \cdot H_{np}}, \quad (4.1)$$

где H_1 – средняя за смену мощность дозы на расстоянии 1 м, мкЗв·м²/ч;

H_{np} – проектная мощность дозы, мкЗв/ч;

R – расстояние от источника до расчетной точки, м.

Средняя за смену мощность эквивалентной дозы излучения без защиты в направлении θ на расстоянии 1 м от мишени ускорителя для фотонейтронного излучения определялась по формуле[4]:

$$H_1 = \frac{1,0 \cdot 10^6 \cdot W \cdot r^2 \cdot c}{T_{нед}}, \quad (4.2)$$

где W – рабочая нагрузка, равная произведению средней дозы за 1 процедуру на число процедур облучения в неделю, $W = 1500$ Гр/нед.;

r – расстояние от источника излучения до изоцентра, 1 м;

$T_{нед}$ – продолжительность рабочего времени в неделю = 60 ч (2 смены по 6 часов, 5 рабочих дней);

c – отношение мощности эквивалентной дозы нейтронов к мощности дозы тормозного излучения в изоцентре, $c = 1,5 \cdot 10^{-3}$ Зв/Гр для энергии фотонов 18 МэВ[5,6].

Средняя мощность дозы нейтронов на расстоянии 1 м в соответствии с формулой (4.2) $H_1(\theta) = 3,75 \cdot 10^4$ мкЗв/ч.

Значения проектной мощности дозы определялись согласно табл.2.2, представленной в СанПиН 2.6.1.2573-10[4] и в пункте 2.1.3 данной работы, которые рассчитываются исходя из пределов дозы для соответствующих категорий облучаемых лиц.

Толщина защиты от нейтронов рассчитывалась с помощью метода длин релаксаций по формуле[4]:

$$d = \lambda \cdot \ln K, \quad (4.3)$$

где: d – толщина защиты, см;

K – необходимая кратность ослабления;

λ – длина релаксации. Для бетона плотностью $2,3 \text{ г/см}^3$ длина релаксации принята равной 16 см [4].

4.1.2 Метод длин релаксаций, представленный в зарубежных работах

Толщину защитных стен с помощью метода длин релаксаций с учетом геометрического ослабления[14]:

$$d_n = \lambda \cdot \ln \frac{H_{n,0}}{\text{ДМД}(R_3 + d_{(n-1)})^2}, \quad (4.4)$$

где λ – длина релаксации нейтронов в бетоне, см;

R_3 – расстояние от мишени до защиты, м;

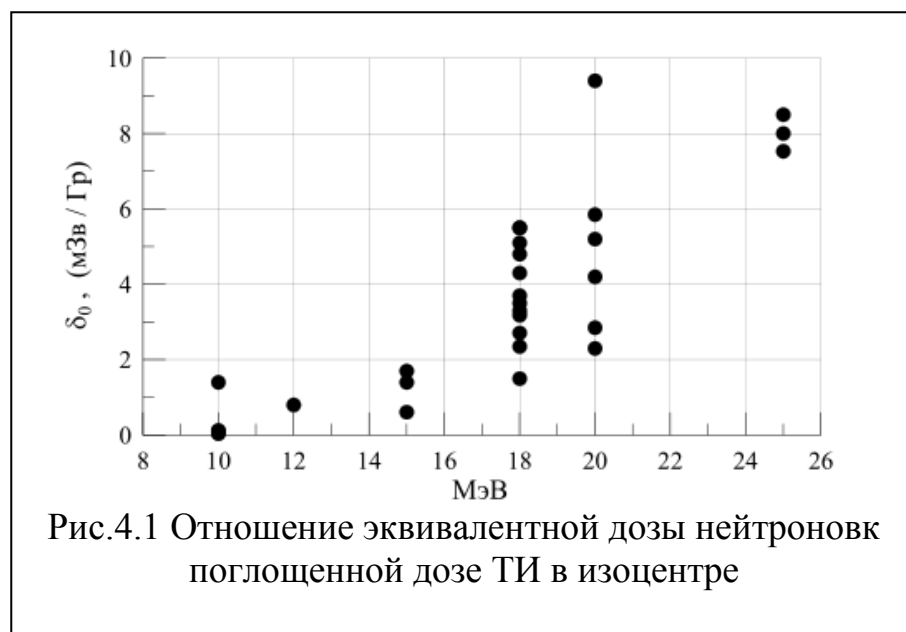
$H_{n,0}$ – средняя мощность эквивалентной дозы от фотонейтронов на расстоянии 1 м от мишени (изоцентра), $\text{мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$.

Мощность эквивалентной дозы от фотонейтронов определялась по формуле:

$$H_{n,0} = \dot{D}_1^\gamma \delta_0, \quad (4.5)$$

где \dot{D}_1^γ – средняя доза фотонов за смену ($150 \text{ Гр}/6 \text{ ч} = 25 \text{ Гр/ч}$);

δ_0 – величина отношения эквивалентной дозы фотонейтронов к поглощенной дозе ТИ (мЗв/Гр). Значение данной величины определялось согласно рис. 4.1.



Для ускорителя с энергией 18 МэВ принимаем значение $\delta_0 = 4$ мЗв/Гр. Следовательно, $\dot{H}_{n,0} = 10^5$ мкЗв/ч.

4.2 Методы расчета вторичной защиты от фотонейтронов

Вторичную защиту определяют фотонейтроны, рождающиеся в ротационной головке и в помещении ускорителя, являясь излучением утечки.

4.2.1 Защита от фотонейтронов утечки

Толщину защиты рассчитаем с помощью метода слоев $\Delta_{1/10}$ ослабления. Для нейтронов, выходящих через защиту радиационной головки ускорителя, величину этого слоя предлагается равную $\Delta_{1/10} = 25$ см[12]:

$$d_n = \frac{\Delta_{1/10}}{\ln 10} \ln \frac{\dot{H}_{n,0}}{\text{ДМД}(R_3 + d_{(n-1)})^2}, \quad (4.6)$$

Поглощенная доза нейтронов вне области рабочего пучка в плоскости и вне плоскости пациента не должна превышать 0,02 % от среднего значения поглощенной дозы[10] ТИ. Следовательно, мощность

эквивалентной дозы утечки фотонейтронов на расстоянии 1 м от мишени вне области и в области рабочего пучка не должна превышать $5 \cdot 10^3 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}$.

4.3 Расчет защиты стен помещения ускорителя от фотонейтронного излучения

Стена 1

Состоит из первичной и вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

Первичная защита

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 2,9 \cdot 10^3$, толщина защиты $d_{11} = 128 \text{ см}$.

- по длине релаксации

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 132 \text{ см}$.

Значение толщины защиты от первичного фотонейтронного излучения примем равным 130 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения будет равна 2,8 мкЗв/ч.

Вторичная защита

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 60 \text{ см}$.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 60 см.

Стена 2

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 61 \text{ см}$.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 60 см.

Стена 3

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 20 мкЗв/ч.

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 29$ см.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 30 см.

Стена 4

Состоит из вторичной защиты. ДМД = 1,2 мкЗв/ч.

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 46$ см.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 50 см.

Стена 5

Состоит из первичной и вторичной защиты. ДМД = 6 мкЗв/ч.

Первичная защита

- *по СанПиН 2.6.1.2573*

Коэффициент ослабления $K = 1 \cdot 10^{23}$, толщина защиты $d_{11} = 74$ см.

- *по длине релаксации*

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 86$ см.

Значение толщины защиты от первичного фотонейтронного излучения примем равным 85 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения будет равна 5,9 мкЗв/ч.

Вторичная защита

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 27$ см.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 30 см.

Потолок

Состоит из первичной и вторичной защиты. ДМД = 20 мкЗв/ч.

Первичная защита

- по СанПиН 2.6.1.2573

Коэффициент ослабления $K = 1,5 \cdot 10^2$, толщина защиты $d_{11} = 83$ см.

- по длине релаксации

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 91$ см.

Значение толщины защиты от первичного фотонейтронного излучения примем равным 90 см.

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения будет равна 33,9 мкЗв/ч.

Вторичная защита

- излучение утечки

Толщина защиты, рассчитанная после 3х итераций, $d_{12} = 32$ см.

Значение толщины защиты от вторичного фотонейтронного излучения примем равным 35 см.

По предложенным двум методам были рассчитаны толщины защиты от первичного и вторичного фотонейтронного излучения. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 4.1, табл. 4.2.

Таблица 4.1

Расчетные значения толщин первичной защиты от фотонейтронного излучения, рассчитанные согласно СанПин 2.6.1.2573-10 и методом длин релаксаций.

| Направление | Толщина защиты из обычного бетона, см | |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | СанПин | Метод длин релаксаций |
| Стена 1 | 128 | 132 |
| Стена 5 | 74 | 86 |
| Потолок | 83 | 91 |

Таблица 4.2

Расчетные значения толщин вторичной защиты от фотонейтронного излучения утечки, рассчитанные методом слоев ослабления

| Направление | Толщина защиты из обычного бетона, см |
|-------------|---------------------------------------|
| Стена 1 | 60 |
| Стена 2 | 61 |
| Стена 3 | 29 |
| Стена 4 | 46 |
| Стена 5 | 27 |
| Потолок | 32 |

По полученным данным можно сделать вывод, что рассчитанные значения толщины защиты с помощью предложенных двух методов согласуются. Различие в полученных данных не превышает 15%.

По проделанным расчетам представлены окончательные значения толщин защиты процедурной линейного ускорителя от первичного и вторичного тормозного излучения, и фотонейтронов в табл. 4.3, табл. 4.4.

Таблица 4.3

Значения толщин первичной защиты

| Направление | Толщина защиты из обычного бетона, см | |
|-------------|---------------------------------------|--------------|
| | Тормозное излучение | Фотонейтроны |
| Стена 1 | 260 | 130 |
| Стена 5 | 205 | 90 |
| Потолок | 205 | 90 |

Таблица 4.4

Значения толщин вторичной защиты

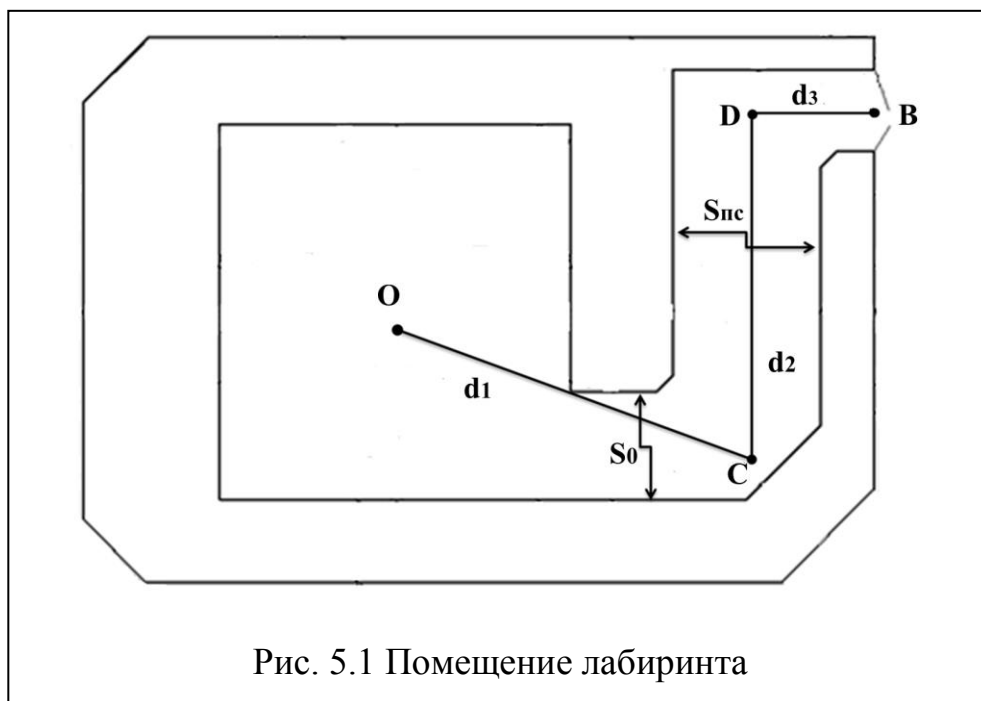
| Направление | Толщина защиты из обычного бетона, см | |
|-------------|---------------------------------------|------------------------|
| | Вторичное ТИ | Вторичное Фотонейтроны |
| Стена 1 | 115 | 60 |
| Стена 2 | 125 | 60 |
| Стена 3 | 80 | 30 |
| Стена 4 | 105 | 50 |
| Стена 5 | 70 | 30 |
| Потолок | 70 | 35 |

Из приведенных выше полученных значений, можно сделать вывод о том, что толщина первичной и вторичной защиты стен процедурного помещения (каньона) определяется тормозным излучением.

5. Расчет лабиринтной защиты

Расчет лабиринтной защиты заключается в расчете мощности эквивалентной дозы на его входе (в т. В).

На рисунке 1 показано помещение, в котором находится ускоритель, с лабиринтом. Представленный лабиринт является лабиринтом с двумя поворотами (изгибами, коленами).



Для электронных ускорителей на энергии более 10 МэВ вклад в дозу на входе в лабиринт вносят следующие типы излучений:

- тормозное излучение (ТИ) основного пучка, рассеянное в помещении ускорителя (в основном от стены 1 и от пола), попавшее в лабиринт и дошедшее до входа в лабиринт;
- ТИ утечки, которое попало в лабиринт и дошло до входа;
- ТИ, рассеянное от пациента, которое попало в лабиринт и дошло до входа;
- гамма-излучение радиационного захвата (захватное гамма-излучение), образующееся при поглощении замедлившихся нейтронов в помещении ускорителя и в лабиринте и дошедшее до входа;

- нейтроны из радиационной головки ускорителя, попавшие в лабиринт и дошедшие до входа.

5.1 Методы расчета мощностей доз

Рассмотрим метод расчета мощности эквивалентной дозы каждой компоненты, входящей в общую мощность эквивалентной дозы на входе в лабиринт.

5.1.1 Мощность дозы от тормозного излучения

Расчет мощности эквивалентной дозы ведем от первичного тормозного излучения без расчета перекрестных отражений (стена – пол). Для учета отражений от пола и потолка вводим коэффициент 2.

Мощность поглощенной дозы на всей площадке, на которую падает первичное излучение, определяется следующим выражением:

$$\dot{D}_{S_1} = \dot{D}_1 \cdot S_1 = C \frac{S_1 \cdot \cos \theta_1}{R_1^2}, \quad (5.1)$$

где \dot{D}_1 – мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени ускорителя;

R_1 – расстояние от источника до центра площадки S_1 , м;

θ_1 – угол между нормалью к S_1 и R_1 .

Площадь каждой рабочей области определяется следующим соотношением:

$$S = L \cdot H, \quad (5.2)$$

где L – длина площадки (определяется по чертежу на миллиметровке с учетом заданного масштаба), м;

H – высота комнаты, м.

Доля излучения, отраженная от площадки S_1 и упавшая на единицу площадки S_2 (δ_1), равна:

$$\delta_1 = \frac{a_1(E_0; \theta_1)}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_2}{R_2^2}, \quad (5.3)$$

где E_0 – энергия первичного излучения электронов.

Доля излучения, отраженная от площадки S_2 и упавшая на единицу площадки S_3 (δ_2), равна:

$$\delta_2 = \frac{a_2(\bar{E}_1; \theta_2)}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_3}{R_3^2}, \quad (5.4)$$

где \bar{E}_1 – средняя энергия фотонов, обратно рассеянных от площадки S_2 .

Доля излучения, отраженная от площадки S_3 и дошедшая до защитной двери равна:

$$\delta_3 = \frac{a_3(\bar{E}_2; \theta_3)}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_4}{R_4^2}, \quad (5.5)$$

где \bar{E}_2 – средняя энергия фотонов, обратно рассеянных от площадки S_3 .

Тогда мощность дозы около защитной двери:

$$\dot{D}_B = \dot{D}_{S_1} \cdot \delta_1 \cdot S_2 \cdot \delta_2 \cdot S_3 \cdot \delta_3 = C \left[\frac{S_1 \cdot \cos \theta_1}{R_1^2} \cdot \frac{a_1(E_0; \theta_1)}{2\pi} \cdot \frac{S_2 \cos \theta_2}{R_2^2} \cdot \frac{a_2(\bar{E}_1; \theta_2)}{2\pi} \cdot \frac{S_3 \cdot \cos \theta_3}{R_3^2} \cdot \frac{a_3(\bar{E}_2; \theta_3)}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_4}{R_4^2} \right], \quad (5.6)$$

Средняя энергия однократного рассеянного излучения рассчитана в программе «Компьютерная лаборатория» в режиме ALBEDO и для тормозного излучения ускорителя составляет $\bar{E} = 0,2$ МэВ.

$$C = 2,5 \cdot 10^7 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^2/\text{ч}.$$

5.1.2 Мощность дозы от захватного гамма-излучения

Захватное гамма-излучение (гамма-излучение радиационного захвата) – излучение, которое образуется при поглощении замедлившихся нейтронов в помещении ускорителя (лабиринте) и дошедшее до входа.

Флюенс и доза от нейтронов, попадающих в лабиринт, зависят от многих параметров:

- от энергии ускорителя;
- от размеров отверстия диафрагмы. Для консервативной оценки флюенса и дозу нейтронов следует определять при закрытой диафрагме;
- от угла поворота гентри. Для расчета защиты от нейтронов и захватного гамма-излучения используют положение гентри, когда пучок ТИ направлен вниз в пол;
- от расстояния между изоцентром и т. А;
- от всей площади поверхности процедурной комнаты;
- от площади выхода из лабиринта и от площади поперечного сечения лабиринта.

Эквивалентную дозу захватного гамма-излучения на входе в лабиринт с двумя изгибами на 1 Гр поглощенной дозы ТИ в изоцентре можно рассчитать по формуле [15]:

$$H_{GN} = 1,114 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi_n \cdot [\sqrt{S_{\text{пс}}} \cdot e^{-(d_2+d_3)/3,89} + e^{-(d_2+d_3)/4}], \quad (5.7)$$

где $S_{\text{пс}}$ – площадь поперечного сечения лабиринта, м²;

d_2, d_3 – из рис. 5.1, м;

Φ_n – полный флюенс нейтронов внутри лабиринта на 1 Гр поглощенной дозы ТИ в изоцентре:

$$\Phi_n = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \quad (5.8)$$

Φ_1 – флюенс первичных нейтронов:

$$\Phi_1 = \frac{\beta \cdot Q_N}{4\pi \cdot d_1^2}, \quad (5.9)$$

где d_1 – расстояние до заданной точки помещения (из рисунка), м;

Q_N – мощность источника нейтронов (нейтр/Гр) – это число нейтронов, испущенных из радиационной головки ускорителя на 1 Гр поглощенной дозы ТИ в изоцентре. Значения приведено в работе [15];

β – коэффициент ослабления нейтронов, выходящих из головки ускорителя (0,85 – для защиты из вольфрама).

Φ_2 – флюенс рассеянных нейтронов:

$$\Phi_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{5,4 \cdot \beta \cdot Q_N}{S}, \quad (5.10)$$

где S – вся площадь поверхности комнаты с ускорителем (процедурной комнаты) на рис. 5.1 (пол, потолок, стены) без площади поверхности лабиринта, м².

$$\Phi_3 = \frac{1}{2\pi} \frac{1,3 \cdot Q_N}{S}, \quad (5.11)$$

Коэффициент $1/2\pi$ для рассеянных и тепловых нейтронов учитывает долю нейтронов, попадающих в лабиринт.

5.1.3 Мощность дозы от фотонейтронов

Мощность эквивалентной дозы от нейтронов для лабиринтов с двумя поворотами можно определить по формуле:

$$\dot{H}_n = \frac{\dot{H}_0}{3} \cdot \frac{1}{d_1^2} \frac{S_0}{S_{\text{пс}}} \cdot 10^{-d_2/TVD} \cdot 10^{-d_3/TVD}, \quad (5.12)$$

где S_0 – площадь выхода из лабиринта, м²;

\dot{H}_0 – мощность эквивалентной дозы нейтронов в изоцентре для заданной мощности поглощенной дозы ТИ в изоцентре, $3,75 \cdot 10^4$ мкЗв·м²/ч;

d_1 – из рис. 5.1, м;

$S_{\text{пс}}$ – площадь поперечного сечения лабиринта, м²;

TVD – расстояние десятикратного ослабления дозы в лабиринте (м), которое зависит от площади сечения лабиринта $S_{\text{пс}}$:

$$TVD = 2,06 \cdot \sqrt{S_{\text{пс}}}, \quad (5.13)$$

5.1.4 Метод расчета защитной двери лабиринта

Для электронных медицинских ускорителей с энергиями более 10 МэВ, как правило, дозу на входе в лабиринт определяют захватное гамма-излучение и нейтроны

Средняя энергия нейтронов на входе в лабиринт примерно 100 кэВ. Для ослабления таких нейтронов необходимо использовать водородсодержащее вещество – полиэтилен. Лучше использовать борированный полиэтилен с добавкой 5 % бора по весу, который эффективно поглощает тепловые нейтроны. При защите дверей лабиринтов слой $\Delta^{1/10}$ полиэтилена равен 45 мм.

Спектр захватного гамма-излучения в бетоне простирается до энергий более 8 МэВ со средней энергией 3,6 МэВ. Слой $\Delta^{1/10}$ свинца равен примерно 6 мм, а стали 48 мм.

Расчет защитной двери на входе в лабиринт от фотонейтронов и излучения гамма-захвата необходимо проводить из условия, что мощность эквивалентной дозы от всех типов излучений не должна превышать ДМД:

$$\text{ДМД} \geq \frac{\dot{H}_{GN}}{K_{GN}} + \frac{\dot{H}_n}{K_n}, \quad (5.14)$$

За защитной дверью находится персонал группы А, ДМД от всех типов излучения составляет 6 мкЗв/ч. Следовательно, расчет для нейтронов и захватного гамма-излучения будем проводить при условии, что ДМД = 3 мкЗв/ч,

Толщина защиты от ТИ в соответствии с [1] определяется по таблицам ослабления для точечного гамма-источника с эффективной энергией ТИ (0,1 МэВ).

Толщину защитной двери от гамма-излучения и нейтронов определяем по формуле:

$$d = \lg K \cdot \Delta_{1/10}, \quad (5.15)$$

5.2 Расчет мощности эквивалентной дозы на входе в лабиринт и защитной двери лабиринта

5.2.1 Расчет мощности дозы от тормозного излучения

Пути прохождения излучения по лабиринту показаны в приложение Б.

Путь I

1) O → S₁₁ → S₁₂ → B;

| | | | |
|----------------------------------|-----|--------------------------|-------|
| S ₁₁ , м ² | 7,1 | R ₁₁ , м | 5,6 |
| S ₁₂ , м ² | 6 | R ₁₂ , м | 8,2 |
| θ ₁₁ , град | 55 | R ₁₃ , м | 2,3 |
| θ ₁₂ , град | 15 | a ₁₁ (18;55) | 0,003 |
| θ ₁₃ , град | 18 | a ₁₂ (0,1;15) | 0,17 |

$$\dot{D}_{B1} = C \left[\frac{S_{11} \cdot \cos \theta_{11}}{R_{11}^2} \cdot \frac{a_{11}(E_0; \theta_{11})}{2\pi} \cdot \frac{S_{12} \cdot \cos \theta_{12}}{R_{12}^2} \cdot \frac{a_{12}(\bar{E}_1; \theta_{12})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{13}}{R_{13}^2} \right] =$$

0,65 мкГр/ч.

2) O → S₂₁ → S₂₂ → B;

| | | | |
|----------------------------------|-----|-------------------------|-------|
| S ₂₁ , м ² | 1,6 | R ₂₁ , м | 7,3 |
| S ₂₂ , м ² | 3 | R ₂₂ , м | 7,65 |
| θ ₂₁ , град | 24 | R ₂₃ , м | 2,3 |
| θ ₂₂ , град | 1 | a ₂₁ (18;24) | 0,003 |
| θ ₂₃ , град | 18 | a ₂₂ (0,1;1) | 0,17 |

$$\dot{D}_{B2} = C \left[\frac{S_{21} \cdot \cos \theta_{21}}{R_{21}^2} \cdot \frac{a_{21}(E_0; \theta_{21})}{2\pi} \cdot \frac{S_{22} \cdot \cos \theta_{22}}{R_{22}^2} \cdot \frac{a_{22}(\bar{E}_1; \theta_{22})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{23}}{R_{23}^2} \right] =$$

0,16 мкГр/ч.

Путь II

1) O → S₁₁ → S₁₂ → S₁₃ → B;

| | | | |
|----------------------------------|-----|--------------------------|-------|
| S ₁₁ , м ² | 7,1 | R ₁₁ , м | 5,6 |
| S ₁₂ , м ² | 7,4 | R ₁₂ , м | 4,65 |
| S ₁₃ , м ² | 5,4 | R ₁₃ , м | 4,9 |
| θ ₁₁ , град | 55 | R ₁₄ , м | 2,4 |
| θ ₁₂ , град | 45 | a ₁₁ (18;55) | 0,003 |
| θ ₁₃ , град | 16 | a ₁₂ (0,2;45) | 0,17 |
| θ ₁₄ , град | 17 | a ₁₃ (0,1;16) | 0,17 |

$$\dot{D}_{B3} = C \left[\frac{S_{11} \cdot \cos \theta_{11}}{R_{11}^2} \cdot \frac{a_{11}(E_0; \theta_{11})}{2\pi} \cdot \frac{S_{12} \cdot \cos \theta_{12}}{R_{12}^2} \cdot \frac{a_{12}(\overline{E}_1; \theta_{12})}{2\pi} \cdot \frac{S_{13} \cdot \cos \theta_{13}}{R_{13}^2} \cdot \frac{a_{13}(\overline{E}_1; \theta_{13})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{14}}{R_{14}^2} \right] = 0,0098 \text{ мкГр/ч.}$$

2) O → S₂₁ → S₂₂ → S₂₃ → B;

| | | | |
|----------------------------------|------|--------------------------|-------|
| S ₂₁ , м ² | 1,6 | R ₂₁ , м | 7,3 |
| S ₂₂ , м ² | 9,4 | R ₂₂ , м | 3,65 |
| S ₂₃ , м ² | 13,5 | R ₂₃ , м | 4,3 |
| θ ₂₁ , град | 24 | R ₂₄ , м | 2,4 |
| θ ₂₂ , град | 72 | a ₂₁ (18;24) | 0,003 |
| θ ₂₃ , град | 18 | a ₂₂ (0,2;72) | 0,27 |
| θ ₂₄ , град | 17 | a ₂₃ (0,1;18) | 0,17 |

$$\dot{D}_{B4} = C \left[\frac{S_{21} \cdot \cos \theta_{21}}{R_{21}^2} \cdot \frac{a_{21}(E_0; \theta_{21})}{2\pi} \cdot \frac{S_{22} \cdot \cos \theta_{22}}{R_{22}^2} \cdot \frac{a_{22}(\overline{E}_1; \theta_{22})}{2\pi} \cdot \frac{S_{23} \cdot \cos \theta_{23}}{R_{23}^2} \cdot \frac{a_{23}(\overline{E}_1; \theta_{23})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{24}}{R_{24}^2} \right] = 0,0096 \text{ мкГр/ч.}$$

Путь III

1) O → S₁₁ → S₁₂ → S₁₃ → B;

| | | | |
|----------------------------------|-----|--------------------------|-------|
| S ₁₁ , м ² | 7,1 | R ₁₁ , м | 5,6 |
| S ₁₂ , м ² | 7,4 | R ₁₂ , м | 4,6 |
| S ₁₃ , м ² | 8,8 | R ₁₃ , м | 3,65 |
| θ ₁₁ , град | 55 | R ₁₄ , м | 4 |
| θ ₁₂ , град | 45 | a ₁₁ (18;55) | 0,003 |
| θ ₁₃ , град | 43 | a ₁₂ (0,2;45) | 0,17 |
| θ ₁₄ , град | 22 | a ₁₃ (0,1;43) | 0,21 |

$$\dot{D}_{B5} = C \left[\frac{S_{11} \cdot \cos \theta_{11}}{R_{11}^2} \cdot \frac{a_{11}(E_0; \theta_{11})}{2\pi} \cdot \frac{S_{12} \cdot \cos \theta_{12}}{R_{12}^2} \cdot \frac{a_{12}(\overline{E}_1; \theta_{12})}{2\pi} \cdot \frac{S_{13} \cdot \cos \theta_{13}}{R_{13}^2} \cdot \frac{a_{13}(\overline{E}_1; \theta_{13})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{14}}{R_{14}^2} \right] = 0,0097 \text{ мкГр/ч.}$$

2) $O \rightarrow S_{21} \rightarrow S_{22} \rightarrow B$;

| | | | |
|----------------------------|-----|--------------------|-------|
| $S_{21}, \text{м}^2$ | 4 | $R_{21}, \text{м}$ | 7,3 |
| $S_{22}, \text{м}^2$ | 8,8 | $R_{22}, \text{м}$ | 5,2 |
| $\theta_{21}, \text{град}$ | 24 | $R_{23}, \text{м}$ | 4 |
| $\theta_{22}, \text{град}$ | 73 | $a_{21}(18;24)$ | 0,003 |
| $\theta_{23}, \text{град}$ | 22 | $a_{22}(0,2;73)$ | 0,26 |

$$\dot{D}_{B6} = C \left[\frac{S_{21} \cdot \cos \theta_{21}}{R_{21}^2} \cdot \frac{a_{21}(E_0; \theta_{21})}{2\pi} \cdot \frac{S_{22} \cdot \cos \theta_{22}}{R_{22}^2} \cdot \frac{a_{22}(\bar{E}_1; \theta_{22})}{2\pi} \cdot \frac{\cos \theta_{23}}{R_{23}^2} \right] =$$

0,19 мкГр/ч.

$$\dot{H}_B = 2 \cdot 1,09 \cdot \bar{w} (\dot{D}_{B1} + \dot{D}_{B2} + \dot{D}_{B3} + \dot{D}_{B4} + \dot{D}_{B5} + \dot{D}_{B6});$$

$$\dot{H}_B = 2,24 \text{ мкЗв/ч};$$

Во время работы ускорителя с максимальной дозы 6 Гр/мин мощность эквивалентной дозы фотонного излучения будет равна 32,3 мкЗв/ч.

5.2.2 Расчет мощности дозы от захватного гамма-излучения

Рассчитанное значение эквивалентной дозы равно:

$$H_0 = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/Гр.}$$

Умножив вычисленную эквивалентную дозу на поглощенную дозу ТИ в изоцентре за неделю W , равную 750 Гр, получаем величину недельной эквивалентной дозы на входе в лабиринт от захватного гамма-излучения:

$$\dot{H}_{GN} = 240 \text{ мкЗв/нед.}$$

Ускоритель работает 30 ч в неделю, средняя мощность эквивалентной дозы на входе в лабиринт составляет:

$$\dot{H}_{GN} = 8 \text{ мкЗв / ч.}$$

5.2.3 Расчет мощности дозы от фотонейтронов

Рассчитанная мощность эквивалентной дозы равна согласно выражению (5.12) равна:

$$\dot{H}_n = 11,6 \text{ мкЗв/ч.}$$

5.2.4 Расчет защитной двери лабиринта

По полученным ранее значениям мощности эквивалентной дозы согласно уравнению (5.15) была рассчитана необходимая кратность ослабления и толщина защитной двери для трех материалов: свинца, стали и полиэтилена:

- Толщина защитной двери от тормозного излучения:

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{\dot{H}_{\text{ТИ}}}{\text{ДМД}_{\gamma}} = 1,86;$$

$$d_{\text{Fe}} = 0,4 \text{ см};$$

$$d_{\text{Pb}} = 0,03 \text{ см}.$$

- Толщина защитной двери от захватного гамма-излучения:

$$K_{\text{GN}} = \frac{\dot{H}_{\text{GN}}}{\text{ДМД}_{\gamma n}} = 2,7;$$

$$d_{\text{Fe}} = \lg K_{\text{GN}} \cdot \Delta_{1/10} = 2,11 \text{ см};$$

$$d_{\text{Pb}} = \lg K_{\text{GN}} \cdot \Delta_{1/10} = 1,2 \text{ см}.$$

- Толщина защитной двери от фотонейтронов:

$$K_n = \frac{\dot{H}_n}{\text{ДМД}_n} = 3,87;$$

$$d = \lg K_n \cdot \Delta_{1/10} = 2,24 \text{ см}.$$

По предложенным методам была рассчитана мощность эквивалентной дозы для всех компонент, входящих в общую мощность эквивалентной дозы на входе в лабиринт и толщины защиты для них. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Расчетные значения толщины защитной двери для разных видов излучения и материалов

| | | ТИ | Гамма-излучение | Фотонейтроны |
|--------------------|------------|------|-----------------|--------------|
| \dot{H} , мкЗв/ч | | 2,24 | 8 | 11,6 |
| K | | 1,86 | 2,7 | 3,87 |
| d , см | Pb | 0,03 | 1,2 | |
| | Fe | 0,4 | 2,11 | |
| | полиэтилен | | | 2,24 |

Как следует из расчета, преобладает вклад в дозу от захватного гамма-излучения и фотонейтронов.

Защитная дверь должна содержать три слоя. Между двумя слоями стали толщиной по 1 см необходимо поместить слой борированного полиэтилена толщиной 2,24 см. При поглощении тепловых нейтронов в полиэтилене будет также возникать захватное гамма-излучение, однако эти гамма-кванты будут ослабляться вторым слоем стали.

6. Расчет средней концентрации озона и необходимой кратности воздухообмена при работе с тормозным излучением электронного ускорителя

При работе ускорителя электронов «Elekta Synergy» в воздухе помещения ускорителя образуются вредные химические вещества: озон и окислы азота. Согласно СанПиН 2.6.1.2573-10 [8], загрязнение воздуха определяется содержанием в нем озона, который оказывает основное вредное воздействие на персонал и пациентов.

За время облучения озон не успевает выйти из зала и кратность воздухообмена не влияет на концентрацию озона в помещении ускорителя, т.к. он работает в кратковременном режиме.

Максимальная мощность дозы, отведенная пациенту при лучевой терапии, составляет 4 Гр/мин.

Для определения концентрации озона за один сеанс терапии использовалась формула:

$$C_{O_3} = \frac{M_{O_3}}{V}, \quad (6.1)$$

где V – объем помещения, м^3 ;

M_{O_3} – масса молекул озона, образовавшихся в единицу времени:

$$M_{O_3} = N_{O_3} \cdot m_{O_3}, \quad (6.2)$$

N_{O_3} – число молекул токсичного вещества O_3 , которое образуется в помещении в единицу времени:

$$N_{O_3} = \frac{10^6 \cdot \dot{H}}{100}, \quad (6.3)$$

\dot{H} – мощность поглощенной энергии тормозного излучения в объеме помещения.

При помощи данной методики концентрацию озона при работе с тормозным излучением электронного ускорителя:

$$C_{O_3} = 0,014 * 10^{-5} \text{ мг/м}^3$$

т.к. ПДК (предельно допустимая концентрация) = $0,1 \text{ мг/м}^3$, следовательно, запретный период не требуется. Данная величина также без учета разбавления в атмосферном воздухе много меньше предельно-допустимой концентрации для населения, равной $0,03 \text{ мг/м}^3$, поэтому очистки воздуха от озона не требуется.

7. Расчет средней объёмной активности ^{13}N от тормозного излучения ускорителя

Расчёт равновесной объёмной активности радионуклида $X(A_v, x)$, образующегося в воздухе помещения ускорителя от первичного тормозного излучения, можно выполнить следующим образом:

$$A_{V,N^{13}}(t) = \frac{2,8 \cdot 10^{-4} \cdot W_{N^{13}} \cdot \lambda_{N^{13}}}{V(\lambda_{N^{13}} + K)} \cdot \{1 - \exp[-(\lambda_{N^{13}} + K)t]\}, \quad (7.1)$$

$\lambda_{N^{13}}$ – количество распадов, 1/ч;

K – кратность воздухообмена, $K = 3$ 1/ч;

$W_{N^{13}}$ – скорость образования радионуклидов.

При помощи описанного метода рассчитали среднюю объёмную активность ^{13}N от тормозного излучения ускорителя:

$$A_{V,N^{13}}(t) = 10^2 \text{ Бк/м}^3,$$

Допустимая объёмная активность (ДОА) = $7,4 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3$,
следовательно, запретный период не требуется.

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособной методики, отвечающей предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [27].

Целью данной диссертационной работы является создание методики расчета медицинских электронных ускорителей на большие энергии. Данная методика должна помочь специалистам при проектировании помещений, где будет находиться ускоритель, корпусов для лучевой терапии онкологических заболеваний.

8.1. Предпроектный анализ

8.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является возможность создания новой единой методики расчета защиты для медицинских ускорителей на большие энергии, путём рассматривания подобных методик за рубежом. В РФ существует только установленная методика в СанПиН 2.6.1.2573-10, которая не дает подробного расчета защиты.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике и здравоохранения РФ.

Сегментировать рынок услуг по использованию методики расчета можно относительно уровня эффективности выполнения требований. Результаты сегментирования представлены в рис.8.1.

| | | Методика расчета | |
|---------|---------|------------------|------------------------|
| | | СанПиН | Разработанная методика |
| Уровень | Средний | | |
| | Высокий | | |

Рис. 8.1. Карта сегментирования рынка услуг относительно уровня выполнения эксплуатационных требований.

8.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Методика будет конкурентоспособной и уровень проникновения на рынок будет высоким, так как на данный момент не разработана методика расчета защиты электронных медицинских ускорителей на большие энергии, по окончании проекта полученная методика не будет иметь аналогов.

Данная методика будет удобна и проста в эксплуатации, потому что в ней используются несложные, простые для понимания уравнения, описывающие процессы взаимодействия излучения с веществом. Для расчета защиты нужно будет использовать только любую ЭВМ, специальное оборудование, приборы, компьютеры не требуются. В связи с этим использование данной методики будет энергоэкономично для компаний.

При использовании методики в построении помещений ускорителей, персонал, работающий с аппаратом, будет лучше защищен от ионизирующего излучения. Будет возможность проводить большее количество сеансов лучевой терапии, следовательно, повысится производительность труда.

Таким образом, по результатам анализа можно сделать вывод о том, что исследование является эффективным, так как обеспечивает качество результатов. Дальнейшее инвестирование данной разработки можно считать целесообразными.

8.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В табл. 8.1 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 8.1

Интерактивная матрица проекта

| Возможности проекта | Сильные стороны проекта | |
|---------------------|-------------------------|----|
| | C1 | C2 |
| B1 | + | + |
| B2 | + | - |
| B3 | + | + |

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в табл.8.2.

Таблица 8.2

Матрица SWOT

| | Сильные стороны проекта | Слабые стороны проекта |
|---|--|---|
| | <p>C1. Малое количество исходных данных.</p> <p>C2. Простота обработки результатов.</p> <p>C3. На данный момент не существует полной методики расчета биологической защиты медицинских ускорителей на большие энергии.</p> <p>C4. Возможность использования методики как на предприятиях, входящих в Росатом, так и в медицинских учреждениях.</p> <p>C5. Готовность проекта к внедрению.</p> | <p>Сл1. Длительный срок исследования для лучшего результата.</p> <p>Сл2. Для использования ускорителей на большие энергии необходима полная методика расчета их биологической защиты, которой в данный момент не существует.</p> <p>Сл3. Сложность проводимых расчетов.</p> <p>Сл4. Необходимость экспериментального подтверждения.</p> <p>Сл5. Зависимость от типа медицинского ускорителя.</p> |
| <p>Возможности</p> <p>B1. Использование результатов исследования для расчета биологической защиты медицинских ускорителей.</p> <p>B2. Улучшение радиационной</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»</p> <p>1. Простота обработки результатов даст нам возможность увеличить</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»</p> <p>1. Из-за длительного срока исследований, может быть приоритет у</p> |

| | | |
|--|--|--|
| безопасности персонала. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В4. Сотрудничество с рядом новых организаций. В5. Публикации в высокорейтинговых журналах способствуют поднятию статуса ВУЗа. | спрос на наш продукт. 2. Надежность и безопасность метода даст возможность установить сотрудничество с рядом новых организаций. 3. Исследование актуально и не имеет аналогов. | конкурентных организаций. 2. Необходимо проверить полученную методику для разных видов ускорителей со своими параметрами и по возможности провести эксперимент. |
| Угрозы У1. Конкуренция. У2. Отсутствие финансирования со стороны, как университета, так и государства. У3. Нежелание многих предприятий сотрудничать. У4. Возможность неиспользования методики в связи со сложностью расчетов. У5. Малое применение ускорителей на большие энергии в медицинских целях. | Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы» 1. Осуществление обработки результатов без применения сложных программ, не даст нам задержку по получению полных результатов для исследования. 2. Работа актуальна и не имеет аналогов. | Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы» 1. Проведение аналогичных расчетов конкурирующими предприятиями. 2. Необходимость упрощения расчетов. 3. Возможность вовлечения иностранных организаций |

На основе результатов проведенного анализа можно сделать вывод о трудностях и проблемах, с которыми так или иначе может столкнуться наш исследовательский проект. В связи с сильными сторонами исследуемого проекта, мы имеем возможность устанавливать сотрудничество с новыми организациями.

Однако мы сталкиваемся также со слабыми сторонами, которые, так или иначе, имеются, необходимость длительного срока исследования отсутствие методики расчета биологической защиты медицинских ускорителей на большие энергии. Поэтому у данного исследования имеются такие угрозы, как не востребованность технологии за счет ее неустойчивой конкурентоспособности и стагнация исследований из-за отсутствия финансирования. Для перекрытия подобных слабых сторон необходимо осуществить обработку результатов с помощью существующих уравнений

для расчета биологической защиты медицинских ускорителей. Это позволит ускорить процесс обработки данных.

Исходя из полученных положительных и отрицательных сторон, мы считаем необходимым вынести данную методику на рынок России.

8.3 Планирование научно-исследовательских работ

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 2 до 15 человек. В рамках выполнения работы рабочая группа, обычно, состоит из дипломника и научного руководителя от ВУЗа. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении магистерской диссертации приведен в табл.8.3.

Таблица 8.3

Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № работы | Содержание работы | Должность исполнителя |
|--------------------------------|----------|--|-------------------------|
| Выбор направления исследования | 1 | Выбор темы исследования | Руководитель |
| | 2 | Выбор направления исследования | Руководитель |
| | 3 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель |
| | 4 | Подбор и изучение материалов по теме | Руководитель Инженер |
| | 5 | Календарное планирование работ по теме | Руководитель Инженер |
| Теоретические исследования | 6 | Анализ литературных источников | Инженер |
| | 7 | Практический расчет | Инженер |
| | 8 | Отчет перед руководителем | Инженер |
| | 9 | Корректировка расчетов | Инженер |
| | 10 | Составление и оформление расчетов | Инженер |
| | 11 | Отчет перед руководителем | Инженер |
| | 12 | Оценка эффективности полученных | Руководитель |

| | | | |
|--------------------------------|----|--|--------------|
| Обобщение и оценка результатов | | результатов | |
| | 13 | Составление пояснительной записки | Руководитель |
| | 14 | Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки | Руководитель |
| | 15 | Подготовка к защите темы | Инженер |

8.4 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится разбивкой по месяцам и декадам за период времени выполнения работы. При этом работы на графике выделены различным цветом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы представлен в табл.8.4.

Таблица 8.4

Календарный план-график в виде диаграммы Ганта

| № | Вид работ | Исполнители | Тк | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | | |
|----|--|--------------|----|------------------------------------|---|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|------|---|
| | | | | Февраль | | Март | | | Апрель | | | Май | | | Июнь | |
| | | | | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 1 | Выбор темы исследования | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Выбор направления исследования | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Подбор и изучение материалов по теме | Руководитель | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| | | Инженер | 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Календарное планирование работ по теме | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| | | Инженер | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Анализ литературных источников | Инженер | 30 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Практический расчет | Инженер | 31 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Отчет перед руководителем | Инженер | 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | Корректировка расчетов | Инженер | 10 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Составление и оформлнение расчетов | Инженер | 20 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Отчет перед руководителем | Инженер | 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Оценка эффективности полученных результатов | Инженер | 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | Составление пояснительной записки | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки | Руководитель | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | Подготовка к защите темы | Инженер | 15 | | | | | | | | | | | | | |

8.5 Определение плановой себестоимости проведения НИОКР

Определение затрат на выполнение НИОКР производится путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов. Калькуляция является основным документом, на основании которого осуществляется планирование и учет затрат на научные исследования.

Калькуляция плановой себестоимости проведения НИОКР составляется по следующим статьям затрат:

1. Материальные расходы.
 2. Затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в НИОКР.
 3. Дополнительная оплата труда исполнителей.
 4. Отчисления во внебюджетные фонды.
 5. Накладные расходы.
- 1) Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (8.1)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров.

Затраты на электроэнергию (использовался ноутбук) рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = \Pi_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (8.2)$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 р./кВтч);

P , кВт – мощность оборудования (ноутбук);

$F_{об}$, ч – время использования оборудования.

При выполнении работы использовался ноутбук со средней мощностью 90 Вт (0,09 кВт).

Затраты на электроэнергию:

$$C_{эл} = 5,8 \cdot 0,09 \cdot 320 = 167,04 \text{ руб.}$$

Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в табл.8.5.

Таблица 8.5

| Материальные затраты | | | | |
|------------------------|---------------|------------|-----------------------|-------------|
| Наименование | Марка, размер | Количество | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
| Электроэнергия | – | 28,8 | 0,058 | 167,04 |
| Распечатка диссертации | – | 100 | 1,5 | 150 |
| Ручка | ErichKrause | 1 | 50 | 50 |
| Доступ в интернет | – | 4 месяца | 350 | 1400 |
| Итого по статье C_m | | | | 1567,04 |

2) Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИОКР, включает в себя основную заработную плату работников (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \text{ руб} \quad (8.3)$$

где $Z_{осн}$, руб – основная заработная плата;

$Z_{доп}$, руб – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \text{ руб} \quad (8.4)$$

где $Z_{\text{осн}}$, руб – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$, раб.дн. – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником;

$Z_{\text{дн}}$, руб – среднедневная заработная плата работника.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \text{ руб} \quad (8.5)$$

где $Z_{\text{м}}$, руб – месячный должностной оклад работника с учётом регионального коэффициента (для Томска – 1,3);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года. При отпуске:

- в 24 рабочих дней $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя.

$F_{\text{д}}$, раб. дн. – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала за вычетом отпуска и больничных. Коэффициент $F_{\text{д}}$ представлен в табл.8.6.

Таблица 8.6

Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней: | | |
| – выходные дни; | 52 | 104 |
| – праздничные дни | 14 | 14 |
| Потери рабочего времени: | | |
| – отпуск; | 48 | 24 |
| – невыходы по болезни | – | – |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 251 | 223 |

Основная заработная плата руководителя (оклад доцента (кандидата наук) 33664 рублей) за период проведения работ равна:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{\text{Фд}} = \frac{33664 \cdot 1,3 \cdot 10,4}{251} = 1813,3 \text{ руб.},$$

На руководителя приходится всего не более $T_{\text{раб}} = 8$ дней.

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 1813,3 \cdot 8 = 14506,4 \text{ руб.}$$

3) Дополнительная заработная плата руководителя за период проведения работ равна:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 14506,4 = 2175,96 \text{ руб.}, \quad (8.6)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$С_{\text{зп.пр}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} = 14506,4 + 2175,96 = 16682,36 \text{ руб.}, \quad (8.7)$$

Основная заработная плата инженера (оклад 9489 рублей) за период проведения работ равна:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{\text{Фд}} = \frac{9489 \cdot 1,3 \cdot 11,2}{223} = 619,6 \text{ руб.},$$

На инженера приходится $T_{\text{раб}} = 108$ рабочих дней.

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} = 619,6 \cdot 108 = 66916,8 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,13 \cdot 66916,8 = 8699,2 \text{ руб.},$$

$$C_{\text{зп.пр}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 66916,8 + 8699,2 = 75616 \text{ руб.}$$

4) Отчисления во внебюджетные фонды входят обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (8.8)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2018 г. установлен размер страховых взносов равный 27,1%.

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя и инженера вычисляются следующим образом:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 16682,36 = 4520,92 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 75616 = 20491,94 \text{ руб.}$$

5) Накладные расходы составляют 25-50% от прочих прямых расходов НИОКР. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (8.9)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов. Примем $k_{\text{накл}} = 30 \%$.

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 16682,36 = 5004,71$$

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 75616 = 22684,8$$

Суммарные затраты на проведение НИОКР сведены в табл.8.7.

Таблица 8.7

Расчет плановой себестоимости

| Наименование статей затрат | Сумма, руб. |
|---|-------------|
| Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых созданием НИОКР | 92298,36 |
| Отчисления на социальные нужды | 25012,86 |
| Накладные расходы | 27689,51 |
| Материальные затраты НИОКР | 1567,04 |
| Итого | 146567,77 |

В ходе выполнения экономической части ВКР были проведены расчеты плановой себестоимости проведения НИОКР и время, необходимое на проведение данной работы. Плановая себестоимость работы составляет 146567,77 руб., основная составляющая которой – заработная плата работников.

8.6 Расчет научно-технического эффекта

В последнее время для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности планируемых и выполняемых госбюджетных и хоздоговорных работ, получил распространение метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИОКР. Суть методики состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент научно-технического эффекта НИОКР по формуле:

$$H = \sum_{i=1}^3 k_i \times n_i , \quad (8.10)$$

где H – показатель НТУ;

k – весовой коэффициент i-го признака НТУ;

n – оценка (в баллах) i-го признака.

Оценки и весовые коэффициенты по каждому из признаков НТУ сведены в табл.8.8, как и баллы, соответствующие данной НИОКР.

Согласно табл.6.8 показатель НТУ равен:

$$H = 0.6 \times 5 + 0.4 \times 6 + 0.2 \times (10 + 2) = 7.8$$

Оценка уровня проводится по следующей шкале:

- 1...4 балла - низкий НТУ
- 5...7 баллов - средний НТУ
- 8...10 баллов - сравнительно высокий НТУ
- 11...14 баллов - высокий НТУ

По этой шкале НТУ приведенной научно-технической работы соответствует среднему уровню.

Таблица 8.8

Оценка НТУ НИОКР

| Признак НТУ | Весовой коэф. | Балл | Характеристика разработки | Выбранный балл |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------------|---|----------------|
| Уровень новизны | 0.6 | 8...10 5...7 2...4 0 | Принципиально новая Новая Относительно новая Не обладает новизной | 5 |
| Теоретический уровень результатов | 0.4 | 10 8 6 2 0.5 | Установление закона Глубокая разработка проблемы Разработка способа (программы, устройства) Элементарный анализ Изложение опыта | 6 |
| Возможность реализации | 0.2 | Время реализации | | 10 |
| | | 10 4 2 | В течение первых лет От 5 до 10 лет Свыше 10 лет | |
| | | Масштаб реализации | | 2 |
| | | 10 4 2 | Народное хозяйство Отрасль Одно или несколько предприятий | |

9 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [28].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [28], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

9.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по

группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В табл. 9.1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 9.1

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ | | Нормативные документы |
|--|--|--------------------|--|
| | Вредные | Опасные | |
| Работа на ПК | Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.) | Электрический ток | <ul style="list-style-type: none"> • ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность • СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 • Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» |
| | | Пожарная опасность | <ul style="list-style-type: none"> • ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности РФ |

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

1. Физические. При работе за компьютером на организм работника воздействуют такие факторы производственной среды как температура и влажность воздуха, вентиляция, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты и освещенность, ионизирующее излучение. При несоответствии данных условий нормированным (регламентированным) значениям производственную среду рассматривают

как вредные условия труда. Например, недостаточное освещение рабочего места отрицательно влияет на зрение работника, при увеличении допустимого уровня шума без защитных средств страдает слуховой аппарат человека, повышенная влажность, так же, как и недостаток влаги в воздухе, приводит к росту вероятности простудных заболеваний.

2. Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы. При любой напряженной работе могут возникать такие вредные производственные факторы, как физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки). Последствия физического и психического истощения организма могут повлиять, как на работоспособность человека, так и на состояние здоровья в целом.

9.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

9.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, работающие на ПЭВМ, не должны иметь медицинских противопоказаний. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

9.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рис. 9.1.

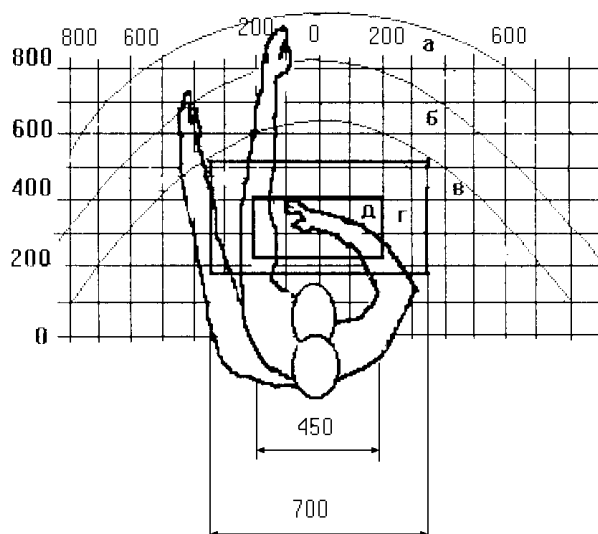


Рис.9.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости
а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-

800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 °С к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 °С. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте ± 3 см;
- по наклону от 10 до 20°относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 °С. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

9.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [29] и приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

| Период года | Температура, °С | Относительная влажность, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Холодный и переходный | 23-25 | 40-60 | 0,1 |
| Тёплый | 23-25 | 40 | 0,1 |

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека;

при объеме помещения более 40 м^3 на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – от 20 до 25 °С, зимой – от 13 до 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеосигнального кабеля. Согласно [29] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [29] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 7,7-10 А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

9.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в

следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Основными факторами поражения, которые возникают в результате действия электрического тока на человека, являются:

Электрические травмы — местное повреждения тканей организма в результате действием электрического тока или электрической дуги. К электрическим травмам можно отнести такие повреждения как электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения.

Электрические знаки — проявляются на коже человека, который подвергся действию тока, в виде пятен овальной формы серого или бледно желтого цвета. Как правило, безболезненны, затвердевают подобно мозоли, со временем омертвевший слой кожи сходит самостоятельно.

Металлизация кожи — возникает в результате проникновения в верхний слой кожи мелких частиц металла, который оплавился под действием электрической дуги. Кожа в месте поражения становится болезненной, становится жесткой, принимает темный металлический оттенок.

Электроофтальмия — возникает в результате воспаления наружной оболочки глаз под действием ультрафиолетовых лучей электрической дуги. Для защиты необходимо пользоваться защитными очками и масками с цветными стеклами.

Механические повреждения проявляются под действием тока, произвольным судорожным сокращением мышц. Это может привести к разрыву кожи, кровеносных сосудов и нервных тканей.

Электрический удар сопровождается возбуждением живых тканей организма током, который через него проходит. В этот момент возникают произвольные судорожные сокращения мышц.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок выполняются в следующей последовательности:

1. Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа.
2. Принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы.
3. Помещение плакатов, указывающих место работы.
4. Заземление корпуса всех установок через нулевой провод.
5. Покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией.

9.4 Пожарная безопасность

Согласно [30], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;

- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В данной работе произведен расчет биологической защиты стен и потолка корпуса лучевой терапии радиологического центра. В ходе дипломной работы было выполнено следующее:

1. Изучены методы расчета биологической защиты медицинского линейного ускорителя.
2. Проведен расчет стен и потолка от тормозного излучения и фотонейтронов медицинского электронного ускорителя Elekta Synergy при работе на энергии 18 МэВ.
3. Проведен расчет толщины входной двери ускорителя.
4. Проведен расчет средней концентрации озона и средней объёмной активности ^{13}N от тормозного излучения ускорителя.
5. Проведен анализ полученных результатов.

На основе анализа результатов, полученных в исследовании, сделаны следующие выводы:

1. Значения толщин защиты для энергии ускорителя 18 МэВ от прямого тормозного излучения, рассчитанные представленными тремя методами, имеют хорошую согласованность.
2. Вторичная толщина защиты для энергии ускорителя 18 МэВ от тормозного излучения определяется излучением утечки.
3. Излучение, рассеянное от пациентов, существенно не влияет на толщину защиты.
4. Конечная толщина защиты стен процедурной ускорителя определяется тормозным излучением, т.к. вклад от нейтронного излучения минимален.
5. Толщина защитной двери на входе в лабиринт должна быть гетерогенной и состоять из трех слоев. Слой борированного полиэтилена толщиной 2,24 см необходимо поместить между двумя слоями стали толщиной по 1 см.

6. Значение средней концентрации озона в процедурной ускорителя не превышает ПДК.

7. Значение средней объёмной активности ^{13}N от тормозного излучения ускорителя превышает ДОА, следовательно, запретный период не требуется.

Список публикаций студента

1. Брожек Д.С., Беспалов В.И. Расчет защитной двери в помещение (процедурную) ускорителя корпуса лучевой терапии.// Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования в современной науке: Материалы XV молодёжной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Санкт-Петербург, 24-25 апреля 2018.-Санкт-Петербург: НИЦ «Открытие», 2018, с.25-28.

Список использованных источников

1. В.И. Беспалов. Лекции по радиационной защите. Издательство ТПУ, 2012. – 508 с.
2. В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. «Защита от ионизирующих излучений». Справочник, М.: Энергоатомиздат. 1995.
3. Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, Е.Е. Ковалев, А.П. Суворов. «Защита от ионизирующих излучений», В 2-х т. Т. 2. Защита от излучений ядерно-технических установок: Учебник для вузов – 2-е изд., М.: Энергоатомиздат. 1983. – 336 с.
4. Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, А.П. Суворов. «Защита от ионизирующих излучений» Т.1. Физические основы защиты от излучений: Учебник для вузов – 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1980. – 461 с.
5. В.Н. Забаев, Применение ускорителей в науке и промышленности: Учебное пособие.- Томск: Изд-во ТПУ, 2008.-190 с.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009 г.
7. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ–99/2010). СП 2.6.1.2612-10. Минздрав России 2010г.
8. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ: Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2573-10.
9. ГОСТ Р МЭК 60601-2-1-2013. Изделия медицинские электрические. Часть 2-1. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к электронным ускорителям, работающим в диапазоне от 1 до 50 МэВ. Москва: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
10. Система роботизированная радиохирургическая Elekta SynergyTM. Технический паспорт. Перевод (Elekta SynergyTM Productdata).
11. Document No. 4513 371 0486. Beam ModulatorTM. Functional Description. 2005 Elekta Ltd.

12. Тарутин, И. Г. Радиационная защита при медицинском облучении И. Г. Тарутин. – Минск: Вышэйш. шк., 2005. – 324 с.
13. National Council of Radiation Protection, USA, Report No 151, Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy, 2005.
14. Lettau, H. H. Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description. J. Appl. Meteorol. (1969), 828-832.
15. Ghiasi H., Mesbahi A. A new analytical formula for neutron capture gamma dose calculations in double-bend mazes in radiation therapy. // Rep PractOncolRadiother. 2012, 17(4), p. 220–225.
16. McGinley P.H. The photon sensitivity of a moderated neutron detector, Med. Phys.13 (1986) 700-702.
17. McGinley P.H. Neutron dose to patients treated with high-energy medical ac-celerators. IAEA-CN-85-8, 2001. – Режим доступа: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:32039942
18. Naseri A., Mesbahi A. A review on photoneutrons characteristics in radiation therapy with high-energy photon beams. // Rep. Pract. Oncol. Radiother. 2010, 15(5), p. 138–144.
19. Mesbahi, A. A Monte Carlo study on neutron and electron contamination of an unflattened 18-MV photon beam. Appl. Radiat. Isot. 67, 55–60 (2009).
20. Monson J.M. Measurements of photo-neutrons from a medical linear accelera-tor using CR-39 plastic nuclear track detectors. Brigham Young University – Idaho, US, 2010. – Режим доступа: <http://search.proquest.com/pqdtglobal/docview/1562520615>
21. Followill, D. S., Stovall, M. S., Kry, S. F. and Ibbott, G. S. Neutron source strength measurements for Varian, Siemens, Elekta, and General Electric linear accelerators. J. Appl. Clin. Med. Phys. 4(3), 189–194(2003).

22. National Council of Radiation Protection, USA, Report No 151, Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radio-therapy, 2005.
23. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Safety Reports Series No. 47, IAEA. 2006. – Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1223_web.pdf
24. Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators. Technical Reports Series No. 188. IAEA, Vienna – 1979.
25. Swanson W.P. Calculation of Neutron Yields Released by Electrons Incident on Selected Materials. SLAC-PUB-2211, 1978. – Режим доступа: <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/2000/slac-pub-2211.pdf>
26. National Council of Radiation Protection, USA, Report No 49, Structural shielding design and evaluation for medical use of X-rays and gamma rays of energies up to 10 MeV, 3-d reprinting, 1998.
27. Medical accelerators / Varian, Siemens, Philips // Elekta [Electronic resource]. Mode of access: <http://ojs.ujf.cas.cz/~mitja/presentations/AV04/08.htm>.
28. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие/ Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
29. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
31. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

Приложение А

Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------|
| 0АМ6М | Брожик Дарья Сергеевна | | |

Консультант школы базовой инженерной подготовки:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------|------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОИЯ | Александров О.А. | к.фил.н. | | |

Консультант – лингвист школы физики высокоэнергетических процессов:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Младший науч. сотрудник | Коньков А.С. | к.ф.-м.н. | | |

Einleitung

Die Strahlentherapie ist neben der Operation und Chemotherapie eine der zentralen Säulen der Krebstherapie. Bei jedem zweiten Krebspatienten kommt im Laufe seiner Erkrankung eine Strahlentherapie zum Einsatz. Im Gegensatz zur medikamentösen, im ganzen Körper wirkenden Chemotherapie ist die Strahlenbehandlung eine rein lokale Maßnahme –die tumorzerstörende Wirkung tritt also nur innerhalb des Bestrahlungsfeldes auf.

Die Strahlentherapie kann als alleinige Behandlungsmethode, in Kombination mit Chemotherapie und nach oder vor einer Operation eingesetzt werden. Darüber hinaus kann eine Strahlentherapie in der Krebsbehandlung eingesetzt werden, um Beschwerden zu lindern oder ihnen vorzubeugen.

Bei der Strahlentherapie werden die Krebszellen mithilfe ionisierender Strahlung. Als Strahlen werden vorwiegend Gammastrahlung, Röntgenstrahlung und Elektronenstrahlung verwendet. In den letzten Jahren wurden auch Anlagen zur Behandlung mit Neutronen, Protonen und schweren Ionen errichtet.

In der modernen Radiotherapie erfolgt die Applikation der Strahlung (Photonen oder Elektronen) in den meisten Fällen mit einem Elektronen-Linearbeschleuniger, kurz LINAC (engl. LINearACcelerator) genannt.

Linearbeschleuniger haben beachtliche Ortsdosisleistungen im Nutzstrahl von 4 Gray/min für Elektronen und 6 Gray/min für Bremsstrahlung jeweils im Abstand von 1 m. Linacs erfordern Betriebsräume mit mächtigen Abschirmungen und fachkundige Strahlenärzte und Medizinphysiker.

Häufiger wird jedoch eine Photonenstrahlung benötigt. Sie kann erzeugt werden, indem man die Elektronen auf ein Target (Wolfram) treffen lässt. Durch den Aufprall auf dieses Target werden die Elektronen gebremst, dabei entstehen Photonen.

Die Photonenstrahlung wird dank ihrer großen Eindringtiefe ins Gewebe vorwiegend für die Behandlung von tief liegenden Tumoren eingesetzt. Die Elektronenstrahlen hingegen eignen sich für die Behandlung von an der Oberfläche gelegenen Tumoren.

Moderne medizinische Elektronenbeschleuniger sind für die Erzeugung therapeutischer Elektronenstrahlung von 2-30 MeV und Photonenstrahlung von 4 bis 25 MeV Grenzenergie ausgelegt [1].

Bei höheren Photonenenergien als etwa 8-10 MeV treten durch Kernphotoeffekte ausgelöste Photoneutronen auf, die einen besonderen Strahlenschutz erfordern.

Ein besonderes Problem stellen die bei hohen Photonenenergien stattfindenden Materialaktivierungen dar, die auch bei abgeschaltetem Strahl zu unerwarteten Strahlenexpositionen des Personals und der Angehörigen der Patienten führen können.

1. Strahlungsgefahr

Bei ausreichend hoher Energie kann es beim Photonenbetrieb der Beschleuniger zu Aktivierungen von Strukturmaterialien, Patienten und der Raumluft im Bestrahlungsraum kommen. Voraussetzungen sind das Überschreiten der Kernphotoschwellen für das jeweilige Material und radioaktive Tochternuklide. Die dabei entstehenden Photoneutronen können durch Neutroneneinfang ihrerseits zu weiteren Aktivierungen führen. Die für eine mögliche Aktivierung wichtigsten Materialien sind in Tab. 1.1 [2] mit den Schwellenenergien und den Tochternukliden zusammengestellt.

Table. 1.1

Daten zur Materialaktivierung durch Kernphotoreaktionen im Photonenbetrieb medizinischer Beschleuniger. Neben den Photoneutronenaus (γ,n)-Prozessen und den Photoprotonenaus (γ,p)-Reaktionen sind auch die beim radioaktiven Zerfall der Tochternuklide entstehenden Sekundärstrahlungen mit aufgeführt. Die Energien bei den Sekundärstrahlungen sind in keV angegeben und beziehen sich auf die Photonenstrahlung der Tochternuklide.

| Reaktion | Schwelle (MeV) | Zerfallsart/Sekundärstrahlungen | T _{1/2} |
|---|----------------|--------------------------------------|------------------|
| $^{12}\text{C}(\gamma,n) ^{11}\text{C}^*$ | 18,7 | β^+ , EC, 511 | 20,4 min |
| $^{14}\text{N}(\gamma,n) ^{13}\text{N}^*$ | 10,5 | β^+ , 511 | 9,96 min |
| $^{16}\text{O}(\gamma,n) ^{15}\text{O}^*$ | 15,68 | β^+ , EC, 511 | 122 s |
| $^{16}\text{O}(\gamma,2n) ^{14}\text{O}^*$ | 28,9 | β^+ , γ , 511, 2313 | 70,6 s |
| $^{27}\text{Al}(\gamma,n) ^{26}\text{Al}^*$ | 12,7 | β^+ , EC, γ , 511, 1810 | 6,4 s |
| $^{63}\text{Cu}(\gamma,n) ^{62}\text{Cu}^*$ | 10,8 | β^+ , EC, 511 | 9,73 min |
| $^{208}\text{Pb}(\gamma,n) ^{207}\text{Pb}$ | 7,9 | stabil | - |
| $^{12}\text{C}(\gamma,p) ^{11}\text{B}$ | 16,0 | stabil | - |
| $^{16}\text{O}(\gamma,p) ^{15}\text{N}$ | 12,1 | stabil | - |
| $^{27}\text{Al}(\gamma,p) ^{26}\text{Mg}$ | 8,3 | stabil | - |
| $^{63}\text{Cu}(\gamma,p) ^{62}\text{Ni}$ | 6,1 | stabil | - |
| $^{208}\text{Pb}(\gamma,p) ^{207}\text{Tl}^*$ | 8,0 | β^- | 4,8 min |

Bleibt die Nennenergie der Photonen unterhalb der Photoreaktionsschwellen, sind selbstverständlich keinerlei Aktivierungen zu erwarten. An etwa 8 MeV Nennenergie treten die ersten Aktivierungen auf. Photonenstrahlungen aus medizinischen Beschleunigern haben Nennenergien zwischen 6 MeV und 21 MeV. Nennenswerte Aktivierung ausbeuten sind vor allem in der Nähe des Bremstargets und des Primärkollimators im Strahlenkopf zu erwarten.

Ein besonderes Problem stellt die durch Neutroneneinfang verursachte unerwartete Erzeugung langlebiger Radionuklide dar, die durch unbekannte Verunreinigungen von Strukturmaterialien entstehen können. In vielen technischen Materialien befinden sich beispielsweise Beimengungen von ^{59}Co , das durch Neutroneneinfang zum betastrahlenden ^{60}Co wird und bei seinem Zerfall mit einer Halbwertszeit von 5,27 Jahren aus dem Tochternuklid ^{60}Ni hochenergetische Gammastrahlung von im Mittel 1,25 MeV freisetzt.

Bei Betrieb mit Photonen- und Elektronenenergien über 10 MeV wird Luft aktiviert. Es entsteht ^{13}N mit 10 min und ^{15}O mit 2 min Halbwertszeit [3]. Bei einer in medizinisch genutzten Räumen üblichen Luftwechselrate von 10- bis 12-mal pro Stunde sind die Aktivitätskonzentrationen unerheblich.

2. Strahlenschutz

Strahlenschutz an medizinischen Beschleunigern umfassen den Schutz des Personals, der Bevölkerung in der Umgebung der Anlagen und der Patienten. Der apparative und bauliche Strahlenschutz muss so ausgelegt sein, dass die Grenzwerte für das Personal und die Bevölkerung eingehalten werden.

Der apparative Strahlenschutz hat die Aufgabe, die Patienten vor unerwünschter Bestrahlung zu schützen. Fremdstrahlungsanteile im Nutzstrahlenbündel können im Photonenbetrieb im Ausgleichskörper für die Homogenisierung und in allen anderen vom Photonenstrahl getroffenen Materialien entstehen. Dabei werden je nach Energie niederenergetische Streuphotonen, Sekundärelektronen oder bei Überschreiten der Kernphotoschwellen auch Photoneutronen erzeugt. Solche Streustrahlungsanteile sind dosimetrisch als Dosisausläufer in den Querprofilen der Bestrahlungsfelder erkennbar. Im Elektronenbetrieb entstehen beim Abbremsen der Elektronen Bremsstrahlungsphotonen in Hoch-Z-Materialien im Strahlerkopf wie Streufohlen und Blendensystem und zu einem geringen Anteil auch direkt im Patienten.

Beim baulichen Strahlenschutz wird nach Abschirmungen im Nutzstrahlenbereich und im Störstrahlungsbereich unterschieden. Zusätzlich sind Maßnahmen gegen eventuelle Materialaktivierungen zu treffen. Linac-Bestrahlungsräume sind deshalb in der Regel allseits durch Betonwände umschlossen. Im Bereich des maximalen Nutzstrahlenbündels und einem zusätzlichen Sicherheitssaum sind die Wände, die Decke und je nach baulicher Auslegung auch der Boden durch Barytbeton verstärkt. Angrenzende betriebliche Bereiche dürfen höchstens Überwachungsbereiche sein.

Der Eingangsbereich der Bestrahlungsräume ist häufig als Streustrahlungslabyrinth ausgelegt (s. Fig. 2.1) [4]. Dies dient zu meinen dazu, durch lange Wege und Mehrfachstreuung der Störstrahlung die Dosisleistungen so herabzusetzen, dass die Abschirmungen in der Zugangstürkleingehalten werden können. Zu man deren hat eine solche Anordnung den Vorteil, dass vom Eingang

her der Fokus des Beschleunigers nicht gesehen werden kann. Dies spart Abschirmmaterialien und bietet eine zusätzliche Sicherheit für das Personal.

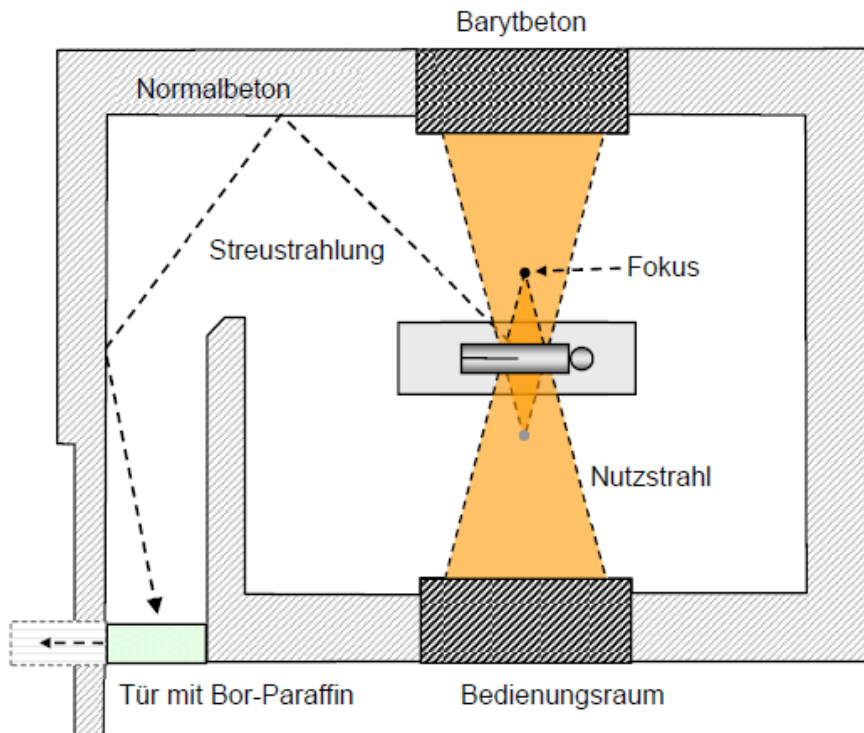


Figura. 2.1 – Grundriss eines Bestrahlungsraumes für medizinische Elektronen-Linearbeschleuniger. Im Bereich des Nutzstrahlenbündels sind die Wände mit Barytbeton verstärkt. Zur Schwächung der Streustrahlung besteht der Zugang hier im Beispiel aus einem Streustrahlungslabyrinth, das auch den direkten Blick auf den Fokus verhindert.

Die baulichen Abschirmungen müssen für alle verwendeten Nutzstrahlungsarten und Strahlungsqualitäten sowie für die durch diese erzeugten Sekundärstrahlungen ausreichend sein. Bei hohen Energien treten durch Kernphotoreaktionen erzeugte Neutronenstrahlungsfelder auf, die zusätzliche Abschirmungsmaßnahmen erfordern. Die üblichen Stärken der Betonwände reichen in der Regel aus, um die Neutronenflüsse auf die zulässigen Grenzwerte herabzusetzen.

Wegen der relativgeringen Wechselwirkung mit Materie sind insbesondere schnelle Neutronen sehr durchdringend. Im Türbereich müssen die Neutronenflüsse dagegen durch zusätzliche Abschirmungen und Moderatoren

herabgesetzt

werden.

Es bedarf einer Kombination mehrerer Schichten verschiedener Materialien, z.B.:

- technisch Wasser, Beton oder Graphit zur Thermalisierung Neutronen;
- Das Paraffin hat die Neutronen durch Stöße zu moderieren;
- das Bor dient wegen seines hohen Wirkungsquerschnitts für Neutroneneinfang als sehr effektiver Neutronenfänger;
- Schwerbeton (Beton mit Baryt BaSO_4 – hohe Ordnungszahl) zur Schwächung der sekundären Gammastrahlung verwendet;
- Blei zur Abschirmung der bei den Reaktion (n, γ) emittierten Gammastrahlung;
- Eisen zur Absorption Neutronen und zugleich zur Schwächung sekundärer Gammastrahlung.

Um den Zutritt zu den Bestrahlungsräumen bei eingeschaltetem Strahl zu verhindern, sind die Türen zum Strahlenbunker mit Sicherheitskontakten versehen. In den Bestrahlungsräumen befinden sich zudem Bewegungsmelder oder Fernsehüberwachungseinrichtungen, die verhindern sollen, dass versehentlich eingeschlossene Mitarbeiter bestrahlt werden. Er hält diese Überwachungsmonitore ein Signal, schalten sie den Beschleuniger automatisch ab. Außerdem befinden sich an mehreren Stellen der Bestrahlungsräume Notausschalter, die den Linac vom Netz trennen und zusätzliche Notöffner für die Eingangstür, die den Strahl unterbrechen.

3. Berechnungsmethoden

Es sind die nachfolgend aufgeführten Strahlungsanteile zu berücksichtigen, soweit sie für den Strahlenschutz innerhalb und außerhalb des Betriebsareals relevant sind:

- Strahlung bei Photonenstrahlbetrieb;
- Strahlung bei Elektronenstrahlbetrieb, Bremsstrahlung;
- Durchlassstrahlung;
- sekundäre Photonenstrahlung (Streustrahlung inkl. Skyshine);
- tertiäre Strahlung (zweifach gestreute Photonenstrahlung und gestreute Durchlassstrahlung);
- direkte Neutronenstrahlung (vom Beschleuniger emittierte Neutronenstrahlung);
- gestreute Neutronenstrahlung (an Auftreffstellen der direkten Neutronenstrahlung);
- Neutronenstrahlung zufolge Kernphotoprozesse (Neutronenstrahlung, die in den Abschirmwänden durch die einfallende Photonenstrahlung über Kernphotoprozesse erzeugt wird).
- Strahlung der durch Kernphotoprozesse erzeugten radioaktiven Stoffe;
- durch Neutroneneinfang erzeugte Gammastrahlung.

Die Bestimmung der Schutzdicke einzelne der aufgeführten Strahlungskomponenten, die auf den zu schützenden Ort einwirken, erfolgt gemäß den Formel [4]:

$$S_i = z_i \cdot n_i, \quad (3.1)$$

wo i – Index zur Kennzeichnung der jeweiligen Strahlungskomponente;

z – Zehntelwertdicke, cm;

n – Anzahl erforderlicher Zehntelwertdicken:

$$n_i = \log_{10} \left[\frac{W \cdot U \cdot T}{H_w} \cdot R_i \cdot q_i \right], \quad (3.2)$$

W – Betriebsbelastung, mGy/Woche;

U – Richtungsfaktor;

T – Aufenthaltsfaktor;

H_w – Ortsdosisrichtwert in einer Woche, mSv/Woche;

R_i – Reduktionsfaktor für die Dosisleistung;

q_i – Koeffizient zur Berücksichtigung der durch die Strahlung verursachten Äquivalentdosis:

- bei Neutronen = 10 mSv/mGy,
- bei Photonen- /Elektronenstrahlung 1 mSv/mGy.

Der Basisdosiswert W ist gleich dem Produkt aus der Anzahl der Einzelbestrahlungen pro Woche und den entsprechenden Mittelwerten für die Wasser-Energiedosis im Referenzabstand $a_0 (= 1 \text{ m})$ vom Divergenzpunkt des Nutzstrahlenbündels.

Der Richtungsfaktor U ist ein Mass für die relative Häufigkeit, mit der Strahlung im beabsichtigten Therapiebetrieb auf die zu bemessende Abschirmung gerichtet ist. Massgebend sind die individuellen Gegebenheiten für den betreffenden Bestrahlungsraum aufgrund von Nutzung und Bestrahlungstechniken. Dabei gilt:

$U = 1$ für den Schutz gegen Durchlassstrahlung, sekundäre und tertiäre Photonenstrahlung und Neutronenstrahlung, unabhängig von der Richtung der Nutzstrahlung;

$U \geq 0,5$ für den Schutz gegen Nutzstrahlung in Richtung Boden oder Wände;

$U \geq 0,25$ für den Schutz gegen Nutzstrahlung in Richtung Decke;

$U = 0$ für den Schutz gegen Nutzstrahlung, wenn das maximale Nutzstrahlenbündel unter Einschluss einer Randzone von 5° bezogen auf den Divergenzpunkt nicht auf den zu schützenden Ort gerichtet werden kann.

Der Aufenthaltsfaktor T ist ein Mass für die maximal zu erwartende, relative Aufenthaltsdauer von Personen an den zu schützenden Orten während des Strahlbetriebes. Dabei gilt:

$T = 0,2$ an außerhalb des Überwachungsbereiches liegenden Orten, welche nicht für den Daueraufenthalt vorgesehen und wo keine Arbeitsplätze eingerichtet sind, wie Warte- und Umkleideräume, Archive, Lager und Keller, Toiletten, Gänge, Treppen, Liftschächte, Trottoirs, Straßen, Grünflächen und Gärten.

$T = 1$ für alle übrigen Orte, wo sich Personen aufhalten können;

$T = 0$ für alle Orte, wo sich keine Personen aufhalten können.

Bei der gleichzeitigen Eiwirkung mehrerer Strahlungskomponenten am gleichen Ort darf die Summe der Ortsdosisleistungen aller Komponenten den zugelassenen Ortsdosisrichtwert nicht überschreiten. Gegebenenfalls muss die Dicke der Abschirmungen angemessen erhöht werden.

Die Bestrahlungsraumtüre ist so zu dimensionieren, dass sie den Strahlenschutz gegen die Strahlungsanteile die Gammastrahlung gewährleistet, die durch Neutroneneinfang in der Türe selbst erzeugt wird.

Trifft die Nutz- oder Durchlassstrahlung nicht senkrecht auf die Abschirmung, darf die verlängerte Weglänge in Strahlrichtung bei deren Bemessung berücksichtigt werden, soweit die in der Abschirmung erzeugte Sekundärstrahlung hinreichend geschwächt bleibt. Diese gegenüber der senkrecht einfallenden Strahlung verlängerte Weglänge im Abschirmungsmaterial kann als massgebende Dicke s der Strahlenschutzabschirmung angenommen werden.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Strahlungsgefahr und der Strahlenschutz im Zimmer für Strahlentherapie präsentiert. Die Berechnungsmethode des Strahlenschutzes ist weit verbreitet und hilft, die Probleme der Strahlensicherheit von Patienten und Personal zu lösen.

Basierend auf der Analyse dieser Berechnungsmethode können wir folgende Schlussfolgerungen ziehen:

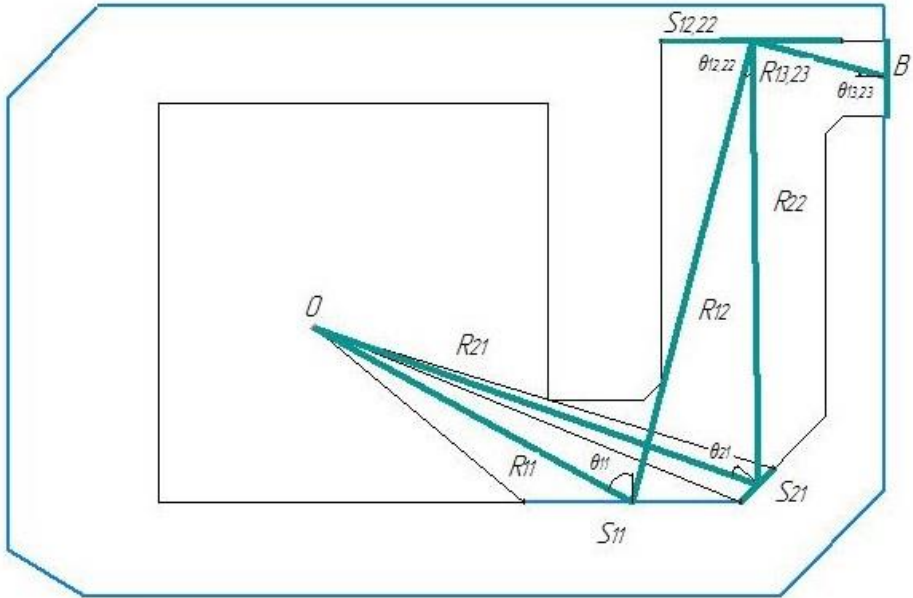
- aus Gründen des baulichen Strahlenschutzes werden Elektronenlinearbeschleuniger in so genannten Strahlenbunkern aus Beton untergebracht;
- im Bereich des Nutzstrahlenbündels wird Schwerbeton (Barytbeton) zur Erhöhung der Abschirmwirkung eingesetzt;
- der Eingangsbereich zum Strahlenbunker ist in der Regel als Labyrinth ausgelegt, um auf diese Weise den Streustrahlungsanteil im Türbereich zu vermindern.

Literatur

1. Nemec H., Roth J., Roser H.W. Zum Strahlenschutz an medizinischen Elektronenbeschleunigern: Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen // Z. Med. Phys. – 1992. – Vol.2. – S.179-184.
2. J. Roth: Neue schweizerische Strahlenschutzgesetzgebung: Änderungen im medizinischen Bereich.// Z. Med. Phys. – 1996. – Vol.6. – S.145-148.
3. Prof. Dr. Henning von Philipsborn, R. Geipel. Radioaktivität und Strahlungsmessung. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006.s. 260.
4. Krieger H. Medizinische Elektronenlinearbeschleuniger. Strahlungsquellen für Technik und Medizin. – Wiesbaden: Springer Spektrum, 2013, s. 195-263.

Приложение Б

ВКР.14.0302.001.1



| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инд. № подл. | Подп. и дата | Взам. инд. № | Инд. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|----------|------|---------------|-------|------|
| | | | | |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| Разраб. | | Брожиц Д.С. | | |
| Проб. | | Беспалов В.И. | | |
| Т.контр. | | | | |
| Н.контр. | | | | |
| Утв. | | | | |

ВКР.14.0302.001.1

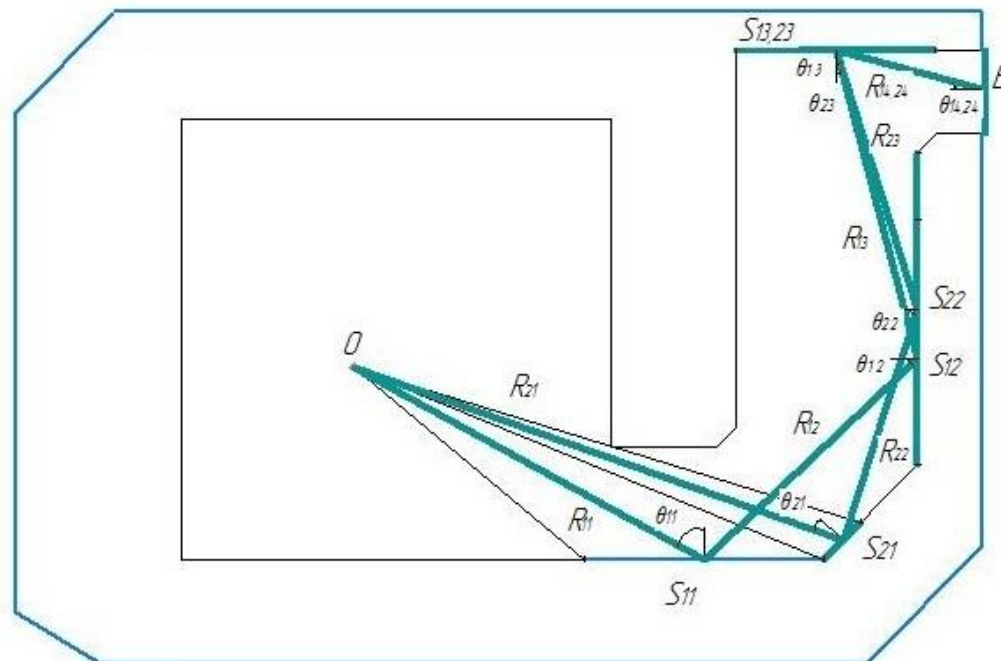
Лабиринт

1 путь

| | | |
|------|--------|---------|
| Лит. | Масса | Масштаб |
| | | 1:1000 |
| Лист | Листов | |

ТПУ гр.ОАМ6М

ВКР.140302.001.2



| | | | | |
|----------|------|---------------|-------|------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| Разраб. | | Бражик Д.С. | | |
| Пров. | | Беспалов В.И. | | |
| Т.контр. | | | | |
| Н.контр. | | | | |
| Утв. | | | | |

ВКР.140302.001.2

Лабиринт

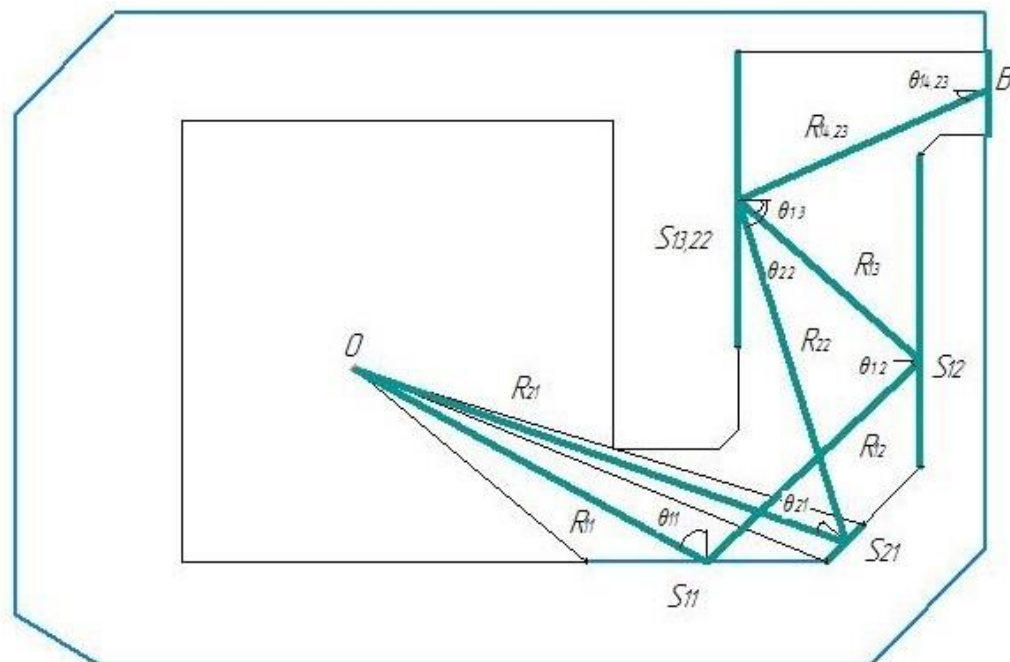
II путь

| Лит. | Масса | Масштаб |
|------|--------|---------|
| | | 1:1000 |
| Лист | Листов | |

ТПУ гр.ОАМ6М

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

ВКР.140302.001.3



| | | | | |
|----------|---------------|----------|-------|------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| Разраб. | Брожек Д.С. | | | |
| Пров. | Беспалов В.И. | | | |
| Т.контр. | | | | |
| Н.контр. | | | | |
| Утв. | | | | |

ВКР.140302.001.3

Лабиринт

III путь

| Лит. | Масса | Масштаб |
|------|--------|---------|
| | | 1:1000 |
| Лист | Листов | |

ТПУ гр.0АМ6М

Подп. и дата

Инд. № докл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инд. № подл.